

UNIVERSIDAD CARLOS III
DE MADRID

Departamento de ingeniería mecánica.



Ingeniería Industrial

Proyecto final de carrera.

**DISEÑO Y SIMULACIÓN
NUMÉRICA DE IMPACTOS SOBRE
FIBRA DE ARAMIDA**

Autor: David García Movilla.

Tutor: Marcos Rodríguez Millán.

Leganés, Octubre 2015.



RESUMEN.

En el presente documento, se realiza un análisis numérico del comportamiento dinámico de la fibra de aramida. La aramida es una fibra sintética, robusta y resistente al calor. Las fibras son fabricadas por diferentes procesos de hilado y extrusión. El grupo de fibras de aramida es un grupo relativamente nuevo y potencialmente importante, basado en la rigidez y en la alta resistencia.

Este tipo de fibras, son cada vez más empleados en ingeniería, ya que sus características principales son, excelente relación resistencia-peso, alto módulo de Young, alta tenacidad y baja fluencia y por último, bajo alargamiento a la rotura. Estas propiedades son particularmente necesarias en aeronáutica, en neumáticos de vehículos o como es nuestro caso, las protecciones personales, (simulación de chalecos antibalas).

El uso de la aramida puede realizarse de dos maneras diferentes. Como tejido único, o embebida en una matriz de resina, la cual aumenta su resistencia pero disminuye su elasticidad. En el presente documento la simulación se realizará como tejido único.

Por tanto, el objetivo a través de este estudio es, analizar el comportamiento y resistencia de dichas fibras, frente al impacto de una bala; simulando este impacto mediante Elementos Finitos con el software comercial Abaqus/Explicit.

Todos los datos experimentales necesarios para dar forma, a las propiedades de los materiales y a los sólidos que se han utilizado en este documento, han sido tomados de diferentes artículos científicos que se irán citando conforme se vaya redactando este documento.

ÍNDICE.

1. Introducción.	11
1.1 Motivación	11
1.2 Objetivos.	12
1.3 Estructura del documento.	12
2. Abaqus y la teoría de los Elementos Finitos.	13
2.1 Elementos finitos.	14
3. Ensayos previos.	19
3.1 Introducción. Artículos científicos..	19
3.2 Placa de aluminio.	21
3.3 Fibras Shell.	24
3.3.1 Partes.	24
3.3.2 Materiales.	25
3.3.3 Assembly.	26
3.3.4 Interacciones y sus propiedades.	27
3.3.5 Empotramiento y velocidad del proyectil.	28
3.3.6 Discusión de resultados.	29
3.4 Fibras sólidas con “Creo Parametric”.	31
3.4.1 Diseño de la pieza.	31
3.4.2 Conjunto.	36
4. Modelo definitivo.	39
4.1 Partes.	39
4.2 Materiales.	43
4.3 Secciones.	45
4.4 Ensamblaje de piezas.	46
4.5 Step y variables a tener en cuenta	50
4.6 Interacciones y propiedades de las mismas.	51
4.7 Constraints.	52



4.8 Condiciones de contorno y velocidad.	55
5. Resultados.	57
5.1 Discusión de resultados.....	79
6. Conclusiones.	81
6.1 Trabajos futuros.	81
7. Bibliografía.	83

Índice de figuras.

Figura 2.1.....	14
Figura 3.1.....	20
Figura 3.2.....	21
Figura 3.3.....	22
Figura 3.4.....	22
Figura 3.5.....	23
Figura 3.6.....	23
Figura 3.7.....	24
Figura 3.8.....	24
Figura 3.9.....	25
Figura 3.10.....	26
Figura 3.11.....	26
Figura 3.12.....	27
Figura 3.13.....	28
Figura 3.14.....	28
Figura 3.15.....	29
Figura 3.16.....	29
Figura 3.17.....	30
Figura 3.18.....	30
Figura 3.19.....	31
Figura 3.20.....	32
Figura 3.21.....	33
Figura 3.22.....	33
Figura 3.23.....	34
Figura 3.24.....	34
Figura 3.25.....	35
Figura 3.26.....	35
Figura 3.27.....	36
Figura 3.28.....	36
Figura 3.29.....	37
Figura 4.1.....	39
Figura 4.2.....	40
Figura 4.3.....	40
Figura 4.4.....	41



Figura 4.5.....	41
Figura 4.6.....	42
Figura 4.7.....	42
Figura 4.8.....	45
Figura 4.9.....	46
Figura 4.10.....	46
Figura 4.11.....	47
Figura 4.12.....	47
Figura 4.13.....	48
Figura 4.14.....	49
Figura 4.15.....	49
Figura 4.16.....	52
Figura 4.17.....	53
Figura 4.18.....	53
Figura 4.19.....	54
Figura 4.20.....	55
Figura 4.21.....	55
Figura 4.22.....	56
Figura 5.1.....	57
Figura 5.2.....	57
Figura 5.3.....	58
Figura 5.4.....	58
Figura 5.5.....	59
Figura 5.6.....	59
Figura 5.7.....	60
Figura 5.8.....	61
Figura 5.9.....	62
Figura 5.10.....	62
Figura 5.11.....	63
Figura 5.12.....	63
Figura 5.13.....	63
Figura 5.14.....	64
Figura 5.15.....	64
Figura 5.16.....	64
Figura 5.17.....	65

Figura 5.18.....	65
Figura 5.19.....	65
Figura 5.20.....	66
Figura 5.21.....	66
Figura 5.22.....	67
Figura 5.23.....	67
Figura 5.24.....	67
Figura 5.25.....	67
Figura 5.26.....	68
Figura 5.27.....	68
Figura 5.28.....	69
Figura 5.29.....	69
Figura 5.30.....	69
Figura 5.31.....	69
Figura 5.32.....	70
Figura 5.33.....	70
Figura 5.34.....	71
Figura 5.35.....	71
Figura 5.36.....	71
Figura 5.37.....	71
Figura 5.38.....	72
Figura 5.39.....	72
Figura 5.40.....	73
Figura 5.41.....	73
Figura 5.42.....	73
Figura 5.43.....	73
Figura 5.44.....	74
Figura 5.45.....	74
Figura 5.46.....	75
Figura 5.47.....	75
Figura 5.48.....	76
Figura 5.49.....	76
Figura 5.50.....	77
Figura 5.51.....	77
Figura 5.52.....	79



Índice de tablas y gráficas.

Tabla 1.....	25
Tabla 2.....	25
Tabla 3.....	43
Tabla 4.....	44
Tabla 5.....	75
Graficas de 50 m/s.....	61
Graficas de 35 m/s.....	63
Graficas de 42 m/s.....	66
Graficas de 44 m/s.....	68
Graficas de 47 m/s.....	70
Graficas de 55 m/s.....	72
Graficas de 60 m/s.....	74
Graficas de 70 m/s.....	75
Graficas de 85 m/s.....	76
Graficas de 100 m/s.....	77
Grafica de velocidades.....	78

(página en blanco a propósito)

1. Introducción.

1.1 Motivación

Desde el descubrimiento de la pólvora, ha surgido la necesidad de una protección contra impactos de armas de fuego. Los materiales tradicionales eran inútiles ante la alta perforación de algunos proyectiles, e incluso actualmente ineficientes contra la fragmentación, ya que si debiésemos protegernos con una plancha de acero contra dichos impactos, deberíamos llevar una pesada carga por el tamaño de dicha plancha.

Como bien explica la tercera Ley de Newton, toda acción conlleva una reacción y en nuestro caso, se define como un aumento de la investigación de la industria en protecciones tanto militares como civiles. Esta investigación se ha producido sobretodo en el último cuarto del siglo XIX, con la aparición de los materiales compuestos que con su gran relación peso-resistencia, son la mejor alternativa para este tipo de protección, aunque también los materiales compuestos o composites, son utilizados en igual o mayor medida en la industria automovilística y en la construcción.

Los más empleados en la actualidad en aspectos de protección, son las fibras tejidas o las láminas de composite, hechas con fibra unidireccional. Estas fibras suelen emplearse mayoritariamente en la fabricación de chalecos y cascos para las protecciones personales.

Cuando se habla de estas protecciones en la actualidad, se está hablando casi exclusivamente de fibra de aramida. La aramida es una poliamida aromática llamada *poliparafenilenotereftalamida*, con una estructura química perfectamente regular, cuyos anillos aromáticos dan como resultado, las moléculas del polímero con unas propiedades de una cadena razonablemente rígida. En 1972 Dupont empezó a comercializar una fibra de aramida con una gran resistencia, bajo el nombre de Kevlar y a finales de los 70 AkzoNoble comenzó a fabricar otra fibra de gran resistencia muy parecida al Kevlar con el nombre de Twaron.

En el campo científico actual, casi todos los ensayos con fibra de aramida, son experimentales y hay muy pocos que consigan buenos resultados en el ámbito de la simulación en Elementos Finitos.

1.2 Objetivos.

El principal objetivo de este documento, es la realización de un modelo mediante Elementos Finitos, que permita la simulación de impactos de proyectiles en una lámina de fibra. Para ello se ha utilizado el software comercial Abaqus/Explicit y para su posterior comprobación, se ha recurrido a artículos científicos publicados con anterioridad.

El material de la fibra, como ya se ha dicho anteriormente, es el Kevlar, material muy utilizado en chalecos anti-balas por sus propiedades, también se utiliza en otro tipo de protecciones como cascos e incluso calzado.

Una vez desarrollado y comprobado el modelo, se procederá a conseguir una gráfica que nos aclare la respuesta de las fibras frente a impactos.

Otro de los objetivos del proyecto será, manejar con fluidez el programa Abaqus y el Creo Parametric (el cual nos permitirá importar sólidos con geometrías complicadas de conseguir en Abaqus), programas muy recurrentes y necesarios en el ámbito de la ingeniería mecánica.

1.3 Estructura del documento

Antes de meternos en profundidad con la explicación del proyecto, conviene explicar un poco cómo está organizado, ya que son muchas cosas las que hay que tener en cuenta.

- **Entorno Abaqus, Elementos Finitos:** se basa en el uso de estas dos herramientas, se hará un breve resumen de cómo se utilizan.
- **Ensayos previos:** se hace un repaso del camino que se ha tenido que seguir hasta que se consiguió el modelo definitivo y con buenos resultados.
- **Modelo definitivo:** como su propio nombre indica, se centra en la explicación en detalle de nuestro modelo final y cómo se ha obtenido.
- **Resultados:** en este epígrafe se muestran y se comentan los resultados obtenidos mediante la simulación y se comparan con los artículos leídos.
- **Conclusiones:** donde se enuncian los objetivos alcanzados a la finalización de este proyecto y los posibles trabajos futuros en esta área.
- **Bibliografía:** en el que se encuentran todas las referencias que han sido necesarias.

2. Abaqus y la teoría de los Elementos Finitos.

El programa Abaqus es un software de elementos finitos que fue desarrollado en la década de los 70, ya que los elementos finitos están pensados para su solución mediante ordenadores.

Este software se utiliza en muchos campos de la ingeniería, como la automovilística, aeroespacial, e incluso en la energética. Abaqus posee muchísimas más aplicaciones y más módulos, pero se han resumido los 8 módulos que serán los más recurrentes en el documento.

- **Partes.** Es el módulo donde se customizará nuestro modelo .cae, creando una geometría nosotros mismos, dibujándola o incluso creando un patrón que la dibuje por nosotros o importándola de otro programa mediante la opción “import”.
- **Materiales.** Es uno de los módulos más importantes ya que será donde se seleccionen las características de nuestro material, desde su módulo de Young y su Poisson, hasta su temperatura de fundición, pasando por su forma de rotura dúctil o frágil.
- **Sección.** Será el módulo donde se creen las secciones compuestas del material, para su posterior asignación a una geometría. Es decir necesitamos estas secciones para poder asignar a la geometría unas características de material dadas.
- **Ensamblaje o “assembly”.** Este módulo se utiliza para la colocación de las geometrías de la manera en que se decida.
- **Interacciones.** En el caso de que se tengan varias geometrías, aquí, se seleccionará cómo van a actuar dichas entre sí. Si deben chocar con rozamiento, sin él, etc.
- **“Constrains”.** En este módulo, de nuevo, si se tienen varias geometrías, se podrán unir por soldadura o pegarlas para que actúen como si fuesen una sola.
- **“BCs”.** En el cual se restringirán movimientos de alguna parte de nuestro objeto, para simular un apoyo simple o un empotramiento.
- **Campos predeterminados.** Es el módulo donde se definirá la velocidad, aunque tiene otras aplicaciones como, pre-cargar alguna parte del objeto antes de que se produzca nuestra verdadera carga, para poder simular fatigas.

2.1 Elementos finitos.

El Método de los Elementos Finitos es un método numérico de resolución de problemas de Mecánica de Sólidos, que resulta de gran utilidad en la práctica. Es una herramienta de cálculo muy potente que permite resolver una gran cantidad de problemas estructurales.

Sin embargo, es un método que no proporciona la solución “exacta” a un problema dado, sino que, en realidad, ayuda a obtener una solución aproximada que, con un buen juicio y valoración de datos, llevará a la solución buscada.

Su funcionamiento es el siguiente: dado un sólido, sometido a un sistema de cargas y anclado por unos apoyos, el método consiste en dividir el sólido en pequeñas partes o elementos conectados entre sí a través de unos puntos denominados nudos.

De manera que, el campo de desplazamientos en el interior de cada elemento, puede expresarse en función de los desplazamientos que sufren los nudos del elemento (desplazamientos nodales); A continuación se pasará a obtener la matriz de rigidez, una por cada elemento en el que se dividió el sólido, las cuales una vez ensambladas, utilizando el análisis matricial de estructuras, permitirán la obtención de los desplazamientos en los nudos de cada elemento. Lo que permitirá llegar, de una forma aproximada, a las tensiones y las deformaciones en el interior del elemento.

En general, en un problema a analizar por el Método de los Elementos Finitos, se conocerán las fuerzas exteriores aplicadas en algunos de sus nudos y los desplazamientos en otros. En resumen para solucionar cualquier problema de elementos finitos se debe llegar a una expresión como esta:

$$\{F\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

En la que, $\{F\}$ es un vector columna, conocido como vector de cargas, en el que se encuentran las fuerzas exteriores, tanto las aplicadas directamente, como las reacciones provocadas por los apoyos. El vector $\{u\}$, denominado vector de desplazamientos nodales, que representa, de manera ordenada, todos los desplazamientos que experimentan los nudos del modelo, y la matriz $[K]$, que se conoce como matriz de rigidez del sistema estructural. Es la parte clave del método.

Si fuéramos capaces de dividir un sólido, considerado éste como un medio continuo, en elementos más pequeños y conseguir una ecuación semejante a (1), se podría resolver cualquier problema relacionado con esfuerzos utilizando Elementos Finitos.

Para ello, se supondrá el elemento triangular de la figura 2.1, que supondremos que trabaja en tensión plana

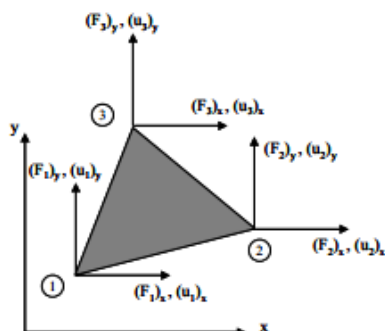


Figura 2.1

Llamando $u(x,y)$ y $v(x,y)$ a las componentes del desplazamiento aproximado en un punto genérico, del elemento según los ejes coordenados, se tiene que:

$$u(x,y) = u = a_1 + a_2x + a_3y$$

$$v(x,y) = v = a_4 + a_5x + a_6y$$

Teniendo en cuenta esto, las deformaciones en su interior serían:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} = a_2 \quad ; \quad \varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} = a_6 \quad ; \quad \gamma_{xy} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} = a_5 + a_3$$

Se demuestra entonces, que al haber seleccionado un desplazamiento lineal, conduce a un campo de deformaciones constante e independiente del punto seleccionado. Este elemento recibe el nombre de elemento triangular de deformación constante y utilizando las ecuaciones constitutivas del material se obtiene:

$$\sigma_x = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y) = \frac{E}{1-\nu^2} (a_2 + \nu a_6)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1-\nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x) = \frac{E}{1-\nu^2} (a_6 + \nu a_2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} \gamma_{xy} = \frac{E}{2(1+\nu)} (a_5 + a_3)$$

Que será el estado tensional dentro del elemento. Más adelante se necesitará determinar los coeficientes que aparecen en las ecuaciones de $u(x,y)$ y $v(x,y)$, para ello se considerarán las coordenadas del nudo 1 (x_1, y_1), las del nudo 2 (x_2, y_2) y las del nudo 3 (x_3, y_3) y se llegará a la siguiente ecuación matricial.

$$\begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \end{Bmatrix}$$

La ecuación podría escribirse también como:

$$\{u\} = [C] \{\alpha\}$$

El vector $\{u\}$, recibe el nombre de vector desplazamientos nodales.

De la ecuación se pueden deducir los valores de los parámetros buscados:

$$\{\alpha\} = [C]^{-1} \{u\}$$

Donde $[C]^{-1}$ sería:

$$[C]^{-1} = \frac{1}{2a} \begin{bmatrix} a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 & 0 \\ b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 & 0 \\ 0 & a_1 & 0 & a_2 & 0 & a_3 \\ 0 & b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \end{bmatrix}$$

De donde se deduce:

$$a_1 = x_2 y_3 - x_3 y_2$$

$$a_2 = x_3 y_1 - x_1 y_3$$

$$a_3 = x_1 y_2 - x_2 y_1$$

$$b_1 = y_2 - y_3$$

$$b_2 = y_3 - y_1$$

$$b_3 = y_1 - y_2$$

$$c_1 = x_3 - x_2$$

$$c_2 = x_1 - x_3$$

$$c_3 = x_2 - x_1$$

$$2a = a_1 + a_2 + a_3$$

Ahora las deformaciones se pueden obtener con:

$$\{\epsilon\} = [H]\{\alpha\}. \text{ De lo que se deduce, } \{\epsilon\} = [H][C]^{-1}\{u\}.$$

De esta última expresión se obtiene el valor de la matriz ($[B] = [H][C]^{-1}$). Los términos de esta matriz por tanto dependen exclusivamente de las coordenadas.

Se pasa ahora a tensiones y deformaciones:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{1-\nu^2} & \frac{\nu E}{1-\nu^2} & 0 \\ \frac{\nu E}{1-\nu^2} & \frac{E}{1-\nu^2} & 0 \\ \text{Simétrica} & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Tension Plana

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{\nu E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & 0 \\ \frac{\nu E}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)} & 0 \\ \text{Simétrica} & 0 & \frac{E}{2(1+\nu)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

Deformacion Plana

Estas ecuaciones en forma matricial son: $\{\sigma\} = [D]\{\epsilon\}$. Y realizando un paso hacia atrás, se llega a que $\{\sigma\} = [D][B]\{u\}$.

$\{\sigma\}$ se denomina vector tensión en el elemento,

$\{u\}$ se denomina vector desplazamientos nodales,

$[D]$ es una matriz que depende de las propiedades elásticas del material y de si trabaja en condiciones de tensión o deformación planas.

$[B]$ es una matriz cuyos elementos dependen de las coordenadas cartesianas de los nudos del elemento.

Una vez definido todo lo anterior se pasa a obtener la matriz de rigidez, $[K]$. Se supone que los nudos de nuestro elemento sufren unos desplazamientos debidos a las fuerzas externas $\{F\}$, que pueden o no, coincidir con los reales. Eso sí, deben ser desplazamientos físicamente posibles, es decir, que si uno de nuestros nudos tiene restringido el movimiento en x no se puede suponer que se mueva en ese eje.

De esta suposición saldrá nuestro vector de desplazamientos nodales virtual, $\{u^v\}$, que será:

$$\{u^v\} = \begin{Bmatrix} (u_1^v)_x \\ (u_1^v)_y \\ (u_2^v)_x \\ (u_2^v)_y \\ (u_3^v)_x \\ (u_3^v)_y \end{Bmatrix}$$

Este vector será necesario para poder aplicar el principio de los trabajos virtuales, en el que se dice que el trabajo realizado por unas fuerzas reales $\{F\}$, debe ser igual al trabajo realizado por las tensiones internas $\{\sigma\}$ reales que actúan dentro del elemento, teniendo en cuenta unas deformaciones virtuales $\{\epsilon^v\}$ dadas por nuestros desplazamientos virtuales. Esto se define en la siguiente fórmula:

$$\{F\}^T \{u^v\} = \int \{\sigma\}^T \{\epsilon^v\} dVol$$

Las matrices de $\{F\}$ y $\{\sigma\}$ deben estar traspuestas para poder realizar los cálculos. Sabiendo que esta ecuación debe cumplirse para cualquier conjunto de desplazamientos virtuales y conociendo que $\{\epsilon^v\} = [B]\{u^v\}$ y que $\{\sigma\}^T = \{u\}^T [B]^T [D]^T$, después de volver a transponer quedaría.

$$\{F\} = \int [B]^T [D] [B] dVol$$

Como el volumen se refiere al volumen del elemento considerado se obtiene directamente la matriz de rigidez.

$$[K] = [B]^T [D] [B] * \text{volumen}.$$

Una vez que se tienen las matrices de rigidez de todos los elementos se tendrían que ensamblar correctamente y ordenadamente, es decir, los desplazamientos del nudo uno con los del uno y no mezclarlos, ya que sino nuestra matriz de rigidez global estaría mal y daría resultados erróneos.

Esto que se ha resumido en este epígrafe, es básicamente lo que hace el software que se va a utilizar para la realización de este proyecto. Por supuesto toda esta cantidad de cálculos hacerlos a mano nos llevaría meses, y más en una geometría como la que se va a utilizar.

Por eso la utilización de dichos software en ingeniería mecánica es de vital importancia y de una gran utilidad.

(página en blanco a propósito)

3. Ensayos previos.

3.1 Introducción. Artículos científicos..

Para comenzar la realización de este proyecto se tuvo que empezar con lo básico, la lectura de anteriores simulaciones y ensayos de este tipo, para comprender mejor en qué se iba a trabajar y cuáles serían los factores a tener en cuenta.

En este proceso fue de una gran ayuda el tutor, Marcos Rodríguez Millán, proporcionando una gran cantidad de artículos en los que se trataban este tema.

La primera parte de artículos que se tuvo en cuenta, fueron sobre modelización de composites de cualquier tipo de fibra. Exclusivamente para ver cómo se simulaban estas fibras en un entorno de Abaqus y de qué manera se podría abordar en el ensayo que se iba a realizar, para hacer una aproximación lo más real posible a estos experimentos ya realizados. Se leyeron artículos tanto de “International Journal of Solid Structures” como de “Composite Structures”.

Una vez realizada esta primera lectura, ya se centró la búsqueda en los que simulasen un experimento parecido al que se iba a realizar. Estos artículos científicos trataban en su mayor parte de experimentos que presentaban impactos en fibra de aramida aunque también se analizaron impactos en diferentes tipos de fibras como de carbono o de vidrio.

Si bien fue una búsqueda larga y un poco tediosa, llevó a comprender con bastante conocimiento cómo se debería abordar el experimento. De una selección de más de 50 artículos, se redujo a 10, en los que está basado este proyecto y se extrajeron las bases para su reproducción en una simulación. A continuación se describen algunos de ellos.

Uno de los artículos fue “Finite element modeling of transverse impact on a ballistic fabric” [8], publicado por *International Journal of Mechanical Sciences*, en el cual se hace impactar un proyectil cilíndrico contra una lámina de fibra de aramida a dos velocidades diferentes y para cada una de estas velocidades, diferentes tipos de condiciones de contorno. Las conclusiones de este experimento están basadas en la absorción de energía de la lámina, y se concluyó, que la mejor manera de bajar la velocidad del proyectil era empotrando los cuatro bordes de nuestra tela y que cuando la velocidad de impacto es baja (200 m/s) las condiciones de contorno tienen un papel muy importante y afectan de manera muy grande a la deformación, distribución de tensiones y a la energía, mientras que a una alta velocidad (400 m/s), produce que las fibras rompan casi instantáneamente, la deformación está localizada en la zona de impacto y las condiciones de contorno no tienen tanto peso.

Otro artículo que se estudió en profundidad es, “Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric” [10], publicado por *Composite Structures*. En el cual se simula el impacto de una esfera contra una lámina. En este experimento se estudia sobre todo la influencia de la fricción entre proyectil-lámina y la de fibra-fibra en dicha lámina, aunque también la influencia de las propiedades del material.

Como era de esperar, para una geometría de tejido dado y proyectil fijo, las propiedades de los materiales, condiciones de contorno y la fricción se acoplan y todos juegan un papel crítico en la determinación de rendimiento balístico. Además, para el

caso estudiado, la fricción entre los hilos es claramente más importante que la fricción entre el proyectil y el tejido. Estudios previos mostraron que al golpear con velocidades muy por encima del límite balístico de la tela, la fricción proyectil-fibra es más beneficiosa que la fricción fibra-fibra. Estos resultados actuales, por lo tanto, deberían ser aplicables para las telas que operan cerca de su límite balístico. Además se demostró que las telas compuestas por hilos de rigidez altas, desaceleran el proyectil más rápido, mientras que las telas compuestas por hilos de alta resistencia, resultaron en el retraso del fallo. Sin embargo, la combinación de alta rigidez y resistencia, los resultados en el rendimiento balístico son más favorable en virtud de las condiciones de contorno impuestas y de las interacciones de fricción.

Otra lectura importante fue, “A deterministic finite element analysis of the effects of projectile characteristics on the impact response of fully clamped flexible woven fabrics” [13], publicado por *Composite Structures*, en la cual se impactó un proyectil de tres diferentes formas, cónica, esférica y cilíndrica, de dos tamaños diferentes cada una de las formas, contra una lámina de fibra de aramida, cuyas condiciones de contorno fueron dejarla empotrada entre 2 platos de acero dejando un hueco circular de 50.8 mm de diámetro.

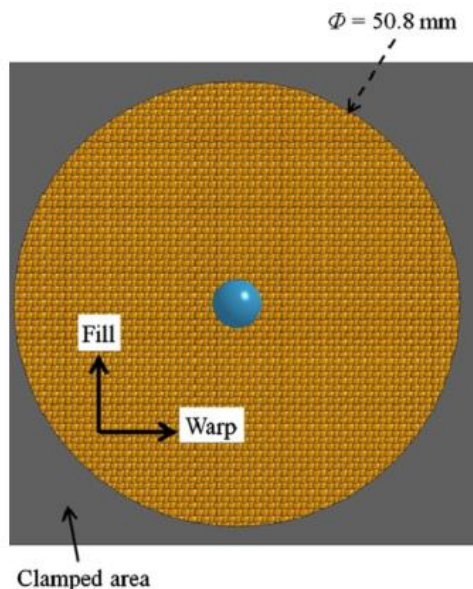
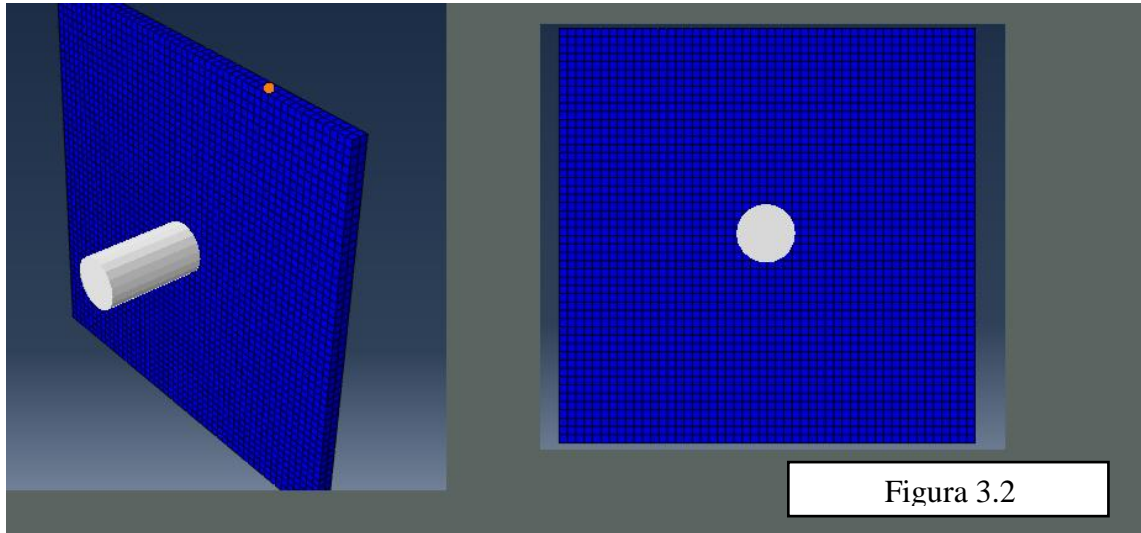


Figura 3.1

Se demostró en este ensayo que la respuesta al impacto dependía mucho de la forma y tamaño del proyectil y que la velocidad residual de menor a mayor del proyectil fue: cilindro grande, esfera grande, cilindro pequeño, cono grande, esfera pequeña y cono pequeño. Y se dejó para estudios de casos posteriores la respuesta de impactos cuando fuesen más de una lámina.

3.2 Placa de aluminio.

Para comenzar a familiarizarse con el entorno de Abaqus y su respuesta dinámica a impactos, para la primera simulación se realizó un experimento sencillo de una placa cuadrada de aluminio 2024-T3 de dimensiones 0.1m x 0.004m.



Un proyectil cilíndrico como sólido rígido no deformable, de dimensiones 30 cm y 10 cm de radio.

El material usado para la placa como ya se ha mencionado fue el aluminio 2024-T3 cuyas propiedades obtenidas de un artículo utilizadas son:

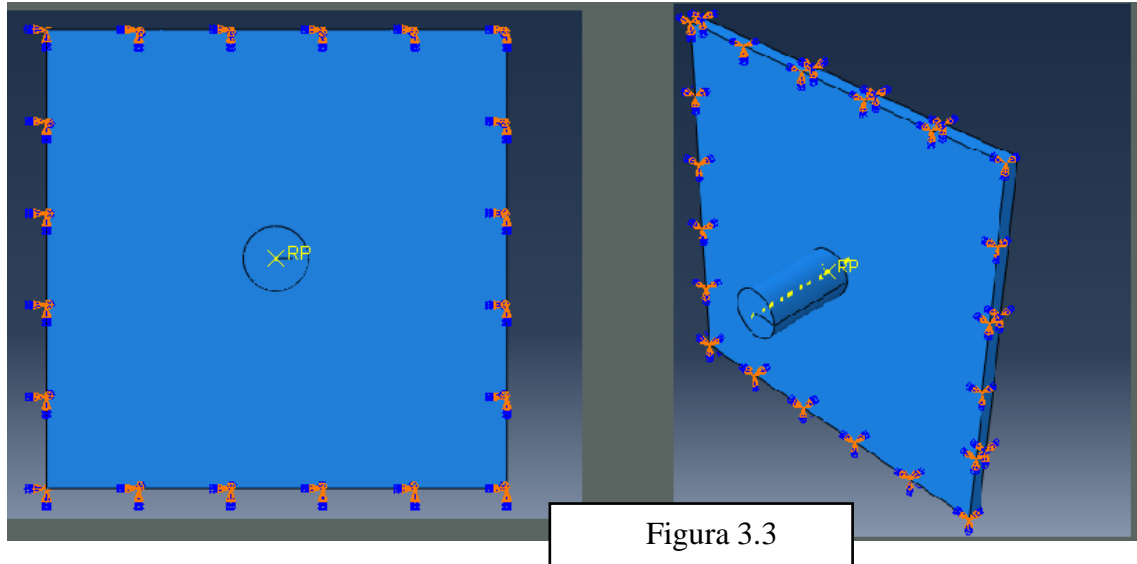
- Densidad: 2700 g/cm³
- E=70GPa Poisson=0.3
- Plasticidad y endurecimiento por Johnson-Cook:
 - A=368.94MPa
 - B=683.95MPa
 - C=0.0083
 - n=0.73
 - m=1.71
- Daño para metales dúctiles Johnson-Cook:
 - D1= 111 MPa
 - D2= 123 MPa
 - D3= 1.5 GPa
 - D4= 7 MPa
 - D5= 0

El proyectil, al haber sido definido como sólido rígido indeformable, no le hace falta propiedades.

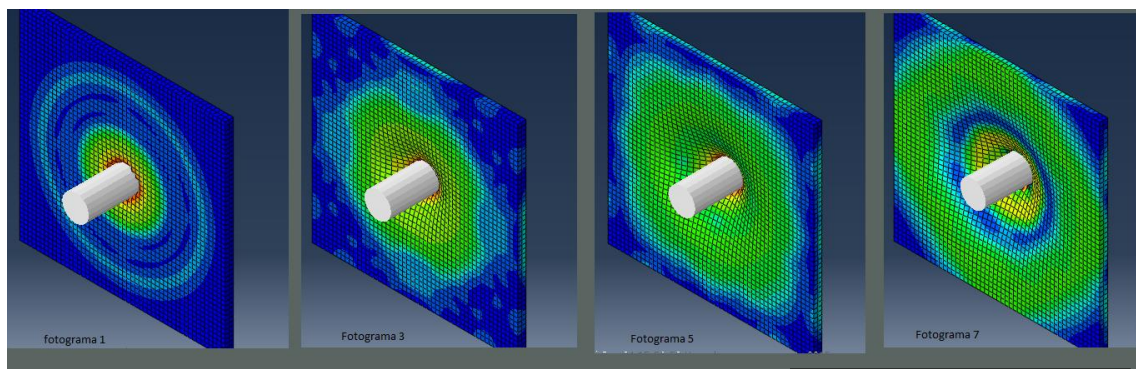
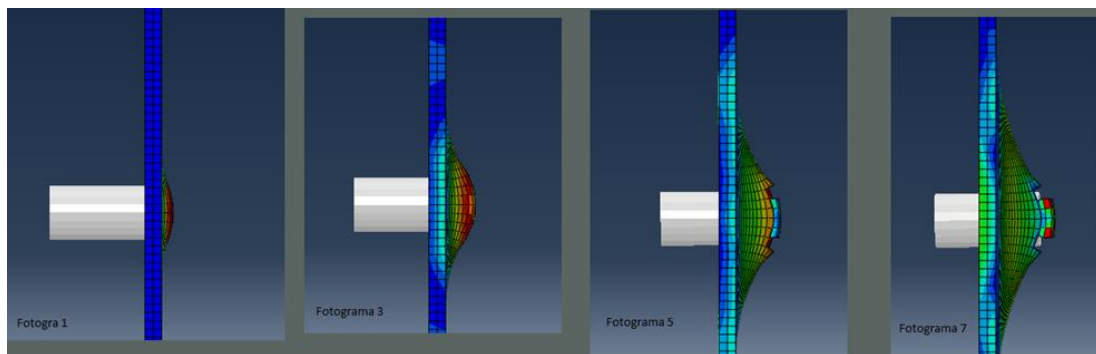
El Assembly y el Step son sencillos de manejar en este caso ya que lo único que se tiene que hacer es colocar la bala en el centro de la placa perpendicular a ella, para su posterior disparo. Mientras que en el módulo “step” se introdujo un periodo de tiempo de 0.00028 s.

A continuación se utilizó una interacción de tipo Penalty entre el proyectil y la placa, y se utilizó un coeficiente de fricción entre ambos de 0.1.

Posteriormente se pasó a empotrar los 4 lados de la placa como se demuestra en la figura:



Y por último haciendo uso del punto de referencia colocado en la bala se le dio una velocidad de 300 m/s para asegurarnos la rotura de dicho material. Como se observa en las siguientes figuras, el proyectil penetra en el sólido produciendo el comienzo de la rotura de este cuando alcanza los 892 MPa en la tensión de Von Mises.



Como se puede observar en esta serie de capturas el proyectil va perforando la placa como se quería. El punto de máxima tensión se produce en el fotograma 5, donde se alcanzan los ya mencionados 892 MPa. A partir de ese momento se produce la degradación del material, hasta la total perforación:

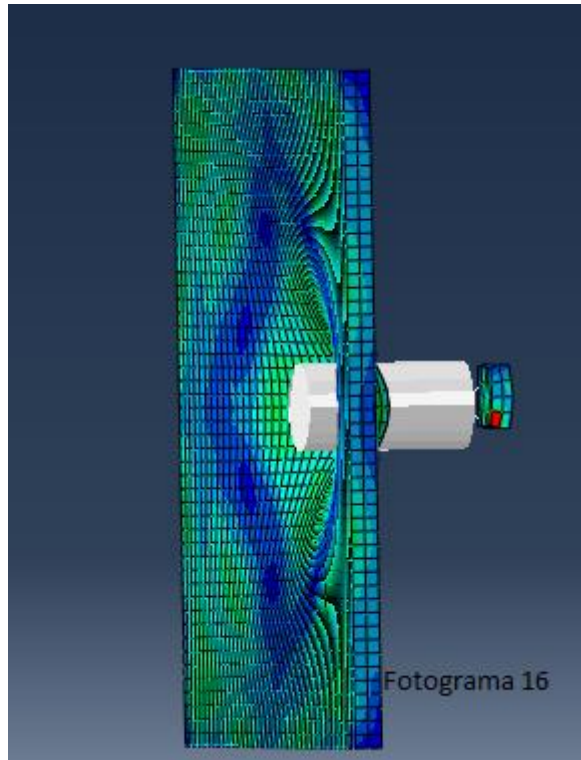


Figura 3.6

Con esta primera aproximación y conocimiento de la utilización de los Elementos Finitos en dinámicas de impacto, se puede proceder a nuestro siguiente ensayo, ya utilizando fibras y condiciones de contorno que serán muy útiles más adelante.

3.3 Fibras Shell.

Para nuestro siguiente paso, se debe mencionar, que conseguir la geometría sólida de una fibra en el entorno de Abaqus es prácticamente imposible por su geometría parecida a una onda. Entonces se decidió que lo más parecido a una fibra que se podía conseguir era con la geometría Shell, y para ver si los resultados podrían extrapolarse se optó por seguir al pie de la letra un artículo conocido y presente en la literatura [8], comparar sus resultados y ver la evolución.

En este artículo se hace impactar un proyectil cilíndrico de 2 g, 8 mm de diámetro y una velocidad de 200 m/s, contra una tela de 39x39 fibras de Kevlar.

3.3.1 Partes.

Para comenzar este modelo se procedió a realizar el dibujo de las fibras, así como del proyectil. En el cual se definirá un punto de referencia donde se aplicarán las inercias ($I_{11}=I_{22}=I_{33}=1 \times 10^{-9}$) y su masa de 2 g.

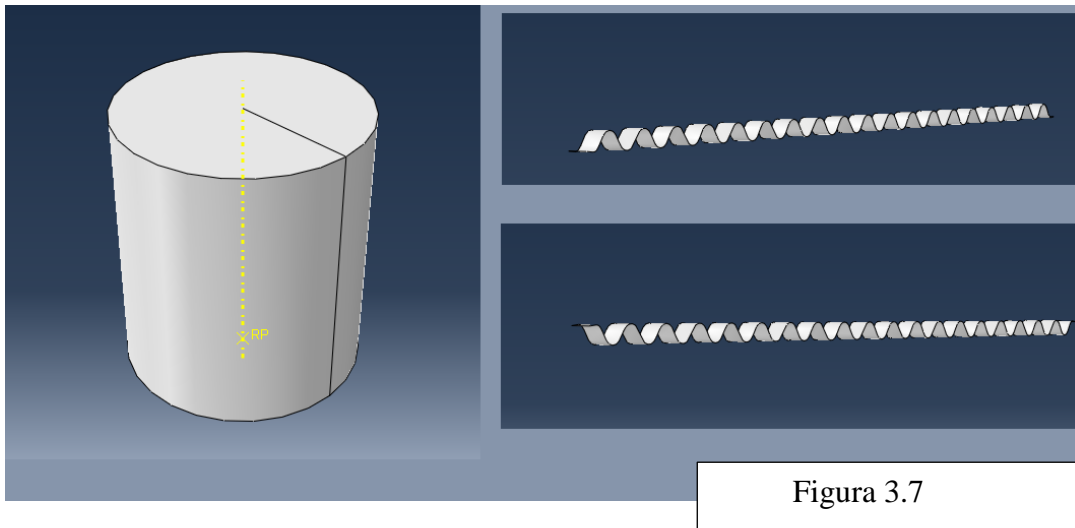


Figura 3.7

El proyectil, al igual que en el artículo, [8], tiene 8 mm de diámetro 9 mm de altura, mientras que la necesidad de dibujar 2 tipos de fibras se debe a esa forma de onda que se aprecia en la figura, ya que si solo se hiciese una se superpondrían las caras y no quedarían entrelazadas.

Una vez más, como en el anterior caso, la bala es un sólido rígido no deformable, mientras que las fibras son tipo Shell extruidas a partir del siguiente boceto:



Figura 3.8

Como en ningún momento del artículo se especifica la profundidad de dicha fibra, se toma 1.2 mm. Una vez definidas las tres partes que van a tomar parte en esta simulación se puede pasar al siguiente módulo.

3.3.2 Materiales.

En este módulo, por primera vez se van a usar las propiedades de la fibra de aramida con una variación, que en nuestra simulación será un material homogéneo y no ortótropo.

Las propiedades que se utilizaron fueron:

- Densidad 1.44 kg/m^3
- $E = 74 \text{ GPa}$, $\nu = 1 \times 10^{-9}$
- Plasticidad:

	Yield Stress	Plastic Strain
	540	0
	957	1.058
	1420	1.1868
	1880	1.295

Tabla 1

- Daño dúctil:

Fracture Strain	Stress Triaxiality	Strain Rate
0.031	0	0.01

Tabla 2

- Evolución del daño de desplazamiento, 0.74, que se obtiene de la multiplicación del tamaño del elemento (0.5) con el que se mallan las fibras, por su deformación máxima (1.48).

En la figura 3.9 se observan todas las propiedades descritas.

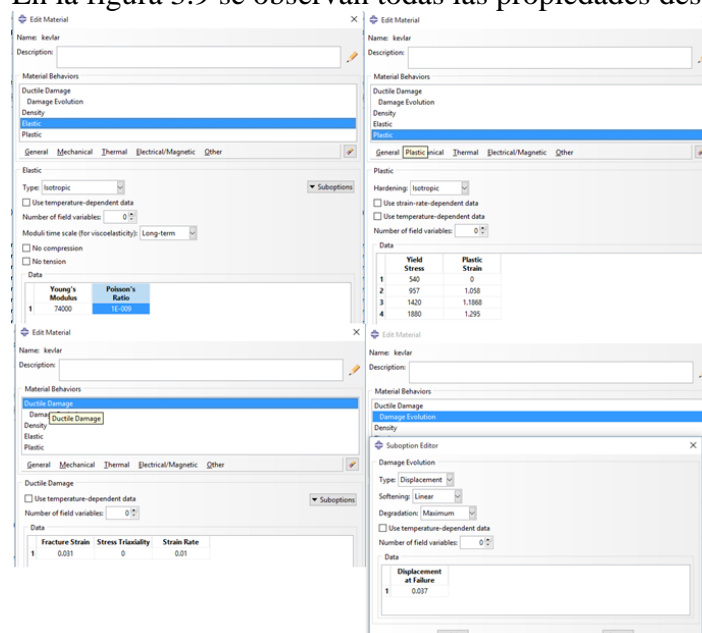


Figura 3.9

3.3.3 Assembly.

En el siguiente paso se explica la colocación de las fibras. En primer lugar, se colocó 1 fibra de cada tipo con una separación de 2mm entre ellas, ya que en el dibujo que se había realizado, si se deja menos espacio, las fibras se superponen en algunos casos y se crean tensiones antes del impacto, es decir que las fibras se tensionan antes de lo deseado y alterarían los resultados.

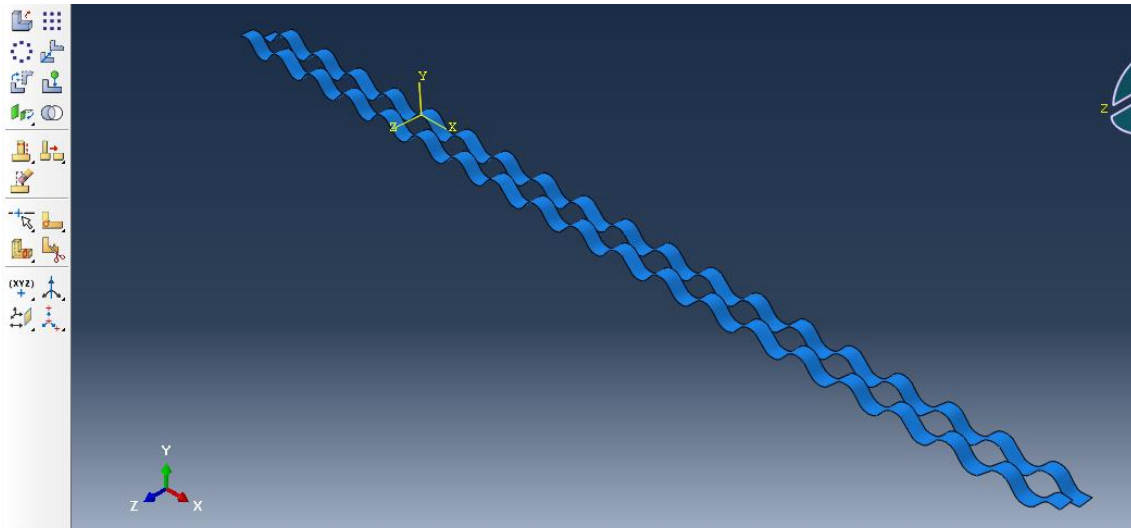


Figura 3.10

Una vez colocadas las 2 fibras con esa distancia de separación, se multiplican con linealidad con una distancia de 4 mm, hasta llegar a esas 39 fibras.

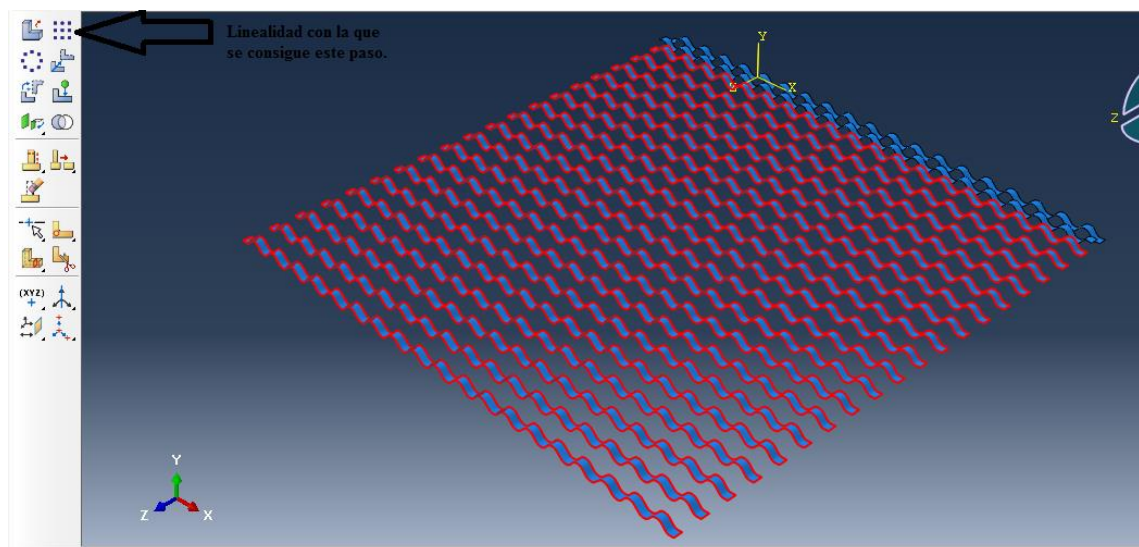


Figura 3.11

Una vez que se tienen todas las fibras según el eje X, se tendrían que colocar las del eje Z. Este paso es el que más dificultad tiene ya que debemos seleccionar todas las fibras, copiarlas y a continuación girarlas 90° según el eje Z y confirmar que no se superponen.

En nuestro caso no se superponen ya que se forzó con la distancia de 2 mm entre fibra y fibra.

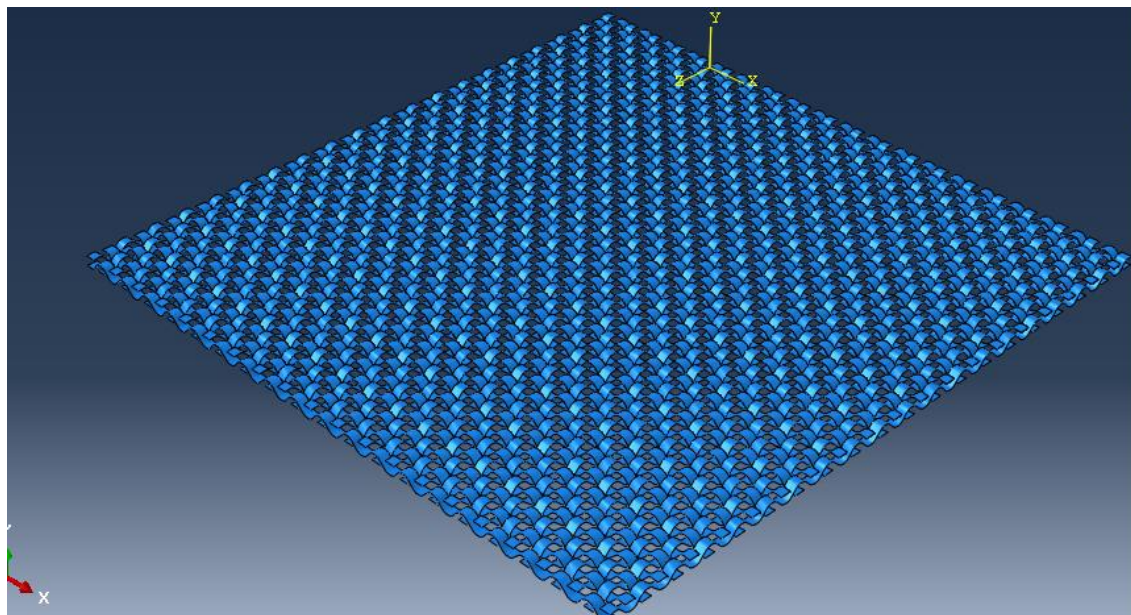


Figura 3.12

Lo último que queda y más sencillo es, colocar el proyectil en el centro de las fibras y prepararlo para el impacto.

3.3.4 Interacciones y sus propiedades.

Se debe tener en cuenta que se tienen dos propiedades importantes, la de fibra-fibra y bala-fibra. En el artículo se explica que estos contactos hay que tenerlos muy en cuenta sobre todo si el proyectil es esférico, porque tendrá mucha más influencia en el bala-fibra.

Por tanto en nuestro caso se considerará sin fricción entre bala-fibra ya que nuestro proyectil es cilíndrico con un “normal behaviour” de “hard contact” y el fibra-fibra, como se especifica en el documento, con un coeficiente de fricción de 0.3 en el “tangencial behaviour” y en su “normal behaviour” se utilizará también el “hard contact”.

Para las interacciones también se diferenciarán entre dos. El proyectil y las fibras con las que entrará en contacto, que se modelizará como contacto superficie con superficie y método de contacto cinemático. Mientras que la interacción fibra-fibra se modelizará como contacto general con las propiedades citadas anteriormente.

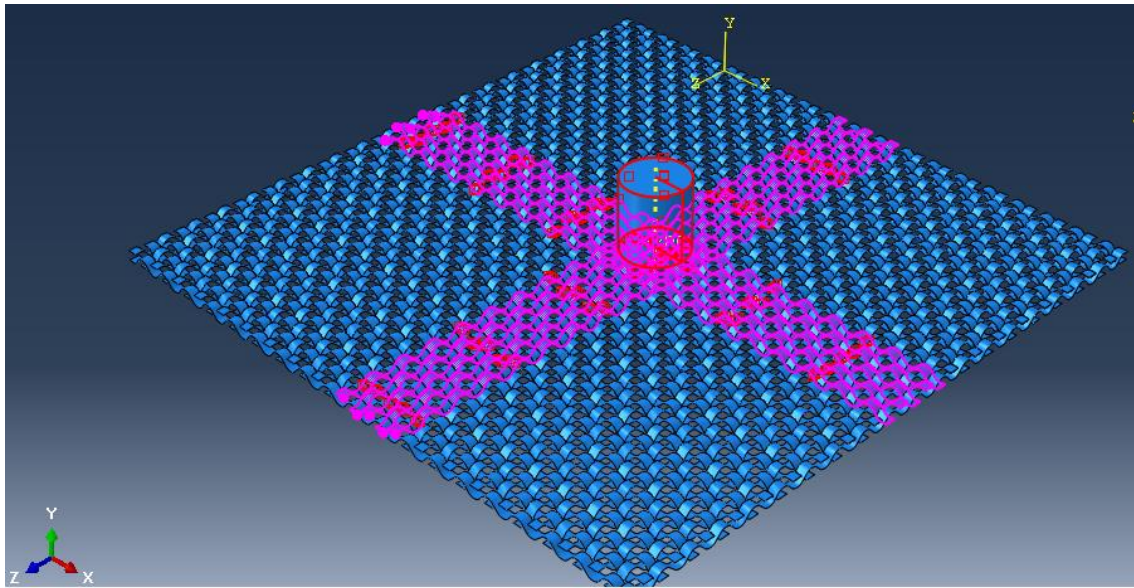


Figura 3.13

En la figura anterior se puede observar las fibras (rosa), con las que el proyectil (rojo) entrará en contacto y por tanto las que sufrirán más carga.

3.3.5 Empotramiento y velocidad del proyectil.

En el siguiente paso se deben empotrar las fibras, proceso que se lleva a cabo en el módulo de Abaqus “BCs”. Se le da un nombre, se busca la categoría mecánica y se selecciona el tipo “encastre”. A continuación se seleccionan los puntos que se desea empotrar y por último, se le restringen todos los desplazamientos ($U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3=0$) para conseguir dicho empotramiento. En la siguiente figura se demuestra cómo queda el modelo.

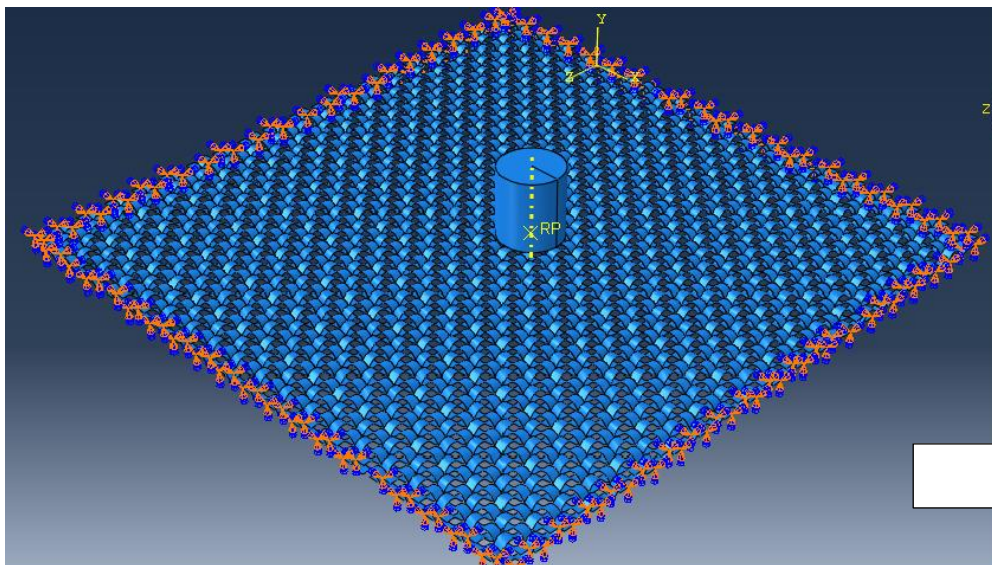


Figura 3.14

Por último, para introducir la velocidad a la bala se debe ir al módulo “predefined fields” de categoría mecánica y se busca el apartado que indica “velocity”. Se debe haber definido un punto de referencia en el proyectil, ya que al ser un sólido rígido todas las propiedades, como masa, inercias y velocidad irán aplicadas en ese punto.

Se dotó entonces de una velocidad uniforme y únicamente de translación en dirección a las fibras de 200 m/s al proyectil y ya se pasó a ver los resultados de nuestra simulación.

3.3.6 Discusión de resultados.

En la siguiente figura se aprecian los resultados del ensayo del artículo [8] y se procede a compararlo con los nuestros.

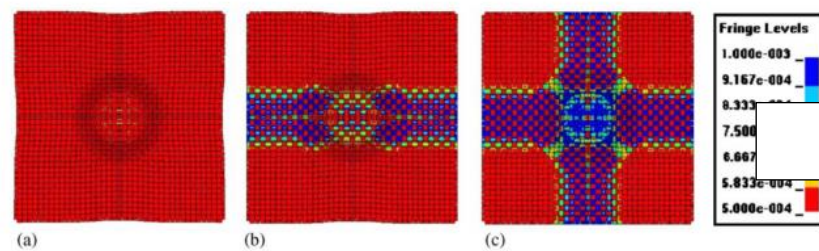


Figura 3.15

Distribution of maximum principal stress ($\times 10^3$ GPa) in the fabric at $8 \mu s$ for the three cases that have the same impact velocity of 200 m/s but different boundary conditions. (a) Four fabric edges left free. (b) Two opposite fabric edges clamped. (c) Four fabric edges clamped.

Poniendo atención en la figura c), que es la que tiene sus 4 lados empotrados como en el simulado, se ve que la tela no llega a romper.

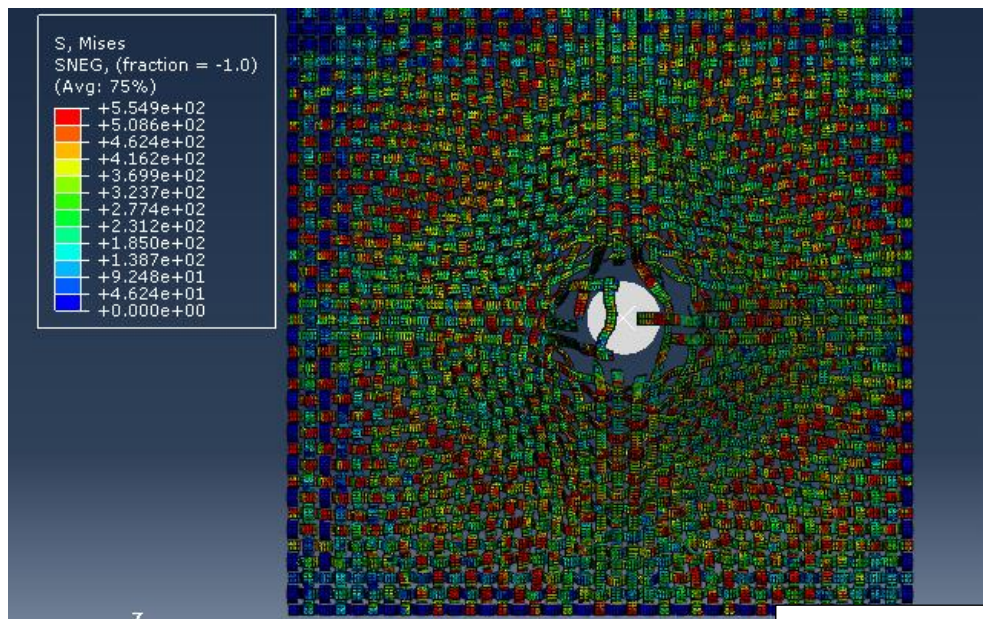


Figura 3.16

La figura 3.16 muestra los resultados obtenidos y se observa que las fibras llegan a una tensión de 549.1 MPa y que sí llega a su punto de rotura.

Lo que lleva a pensar que al ser solo una superficie rompen antes de lo que deberían aunque los contactos sean los mismos.

El contacto fibra-fibra se aprecia que al haber diseñado las fibras como una onda se producen más tarde de lo deseado. Aunque la interacción sea buena, el contacto no se hace en el momento en que debería, por tanto se utilizará la interacción pero no la Shell ondulada.

Mientras que los desplazamientos de la figura 3.17 son los del artículo y la figura 3.18 son nuestros resultados.

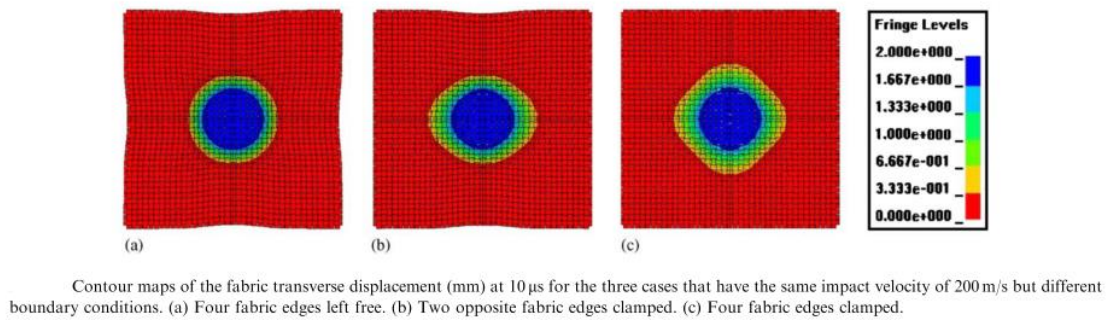


Figura 3.17

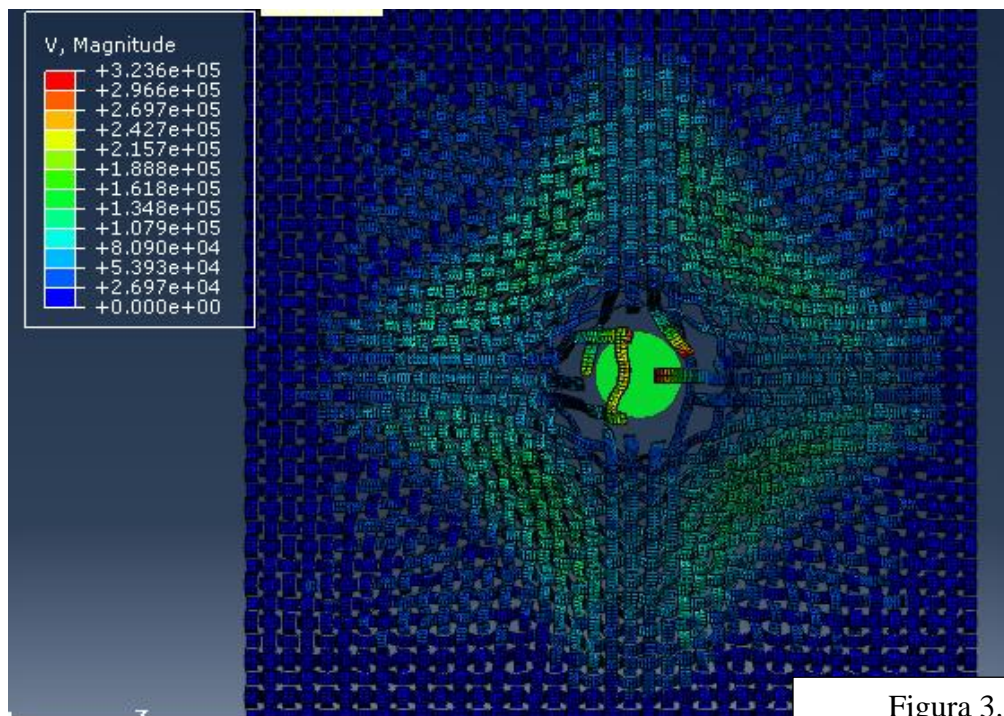


Figura 3.18

Con lo que se concluye que se necesita diseñar las fibras como sólido y no como Shell ya que su desplazamiento también es diferente, lo que desembocó en nuestro último ensayo previo.

3.4 Fibras sólidas con “Creo Parametric”.

Posteriormente a todos nuestros ensayos se concluyó que para conseguir unos mejores resultados, y por consiguiente un mejor diseño y modelado de la lámina de fibras, se necesitará diseñar nuestra geometría de la fibra como un sólido.

Ya que este proceso, como ya se comentó en este documento, era muy complicado diseñarlo en Abaqus, se optó por utilizar otro programa de diseño, para luego importar a nuestro software de Elementos Finitos como pieza. El programa de diseño seleccionado fue el “PTC Creo Parametric 2.0”.

“Creo Parametric” es una herramienta esencial en el diseño 3D de objetos. Utiliza las mejores prácticas de diseño, manteniendo los estándares de la industria. Es un software con capacidades muy flexibles y con la posibilidad de realizar alteraciones al final del proceso de diseño. Como “Creo Parametric” se integra fácilmente con el resto de aplicaciones, ya no se corre el riesgo de perder datos al transmitirlo a través de plataformas y eliminar así los errores de transferencia de datos. Por tanto, se tiene la posibilidad de mover sin problemas entre 2D y 3D sin afectar a la estructura de diseño original, lo que resultó especialmente útil en el proyecto.

3.4.1 Diseño de la pieza.

Para comenzar el diseño, el programa preguntará qué se desea construir y se debe seleccionar pieza y sólido.

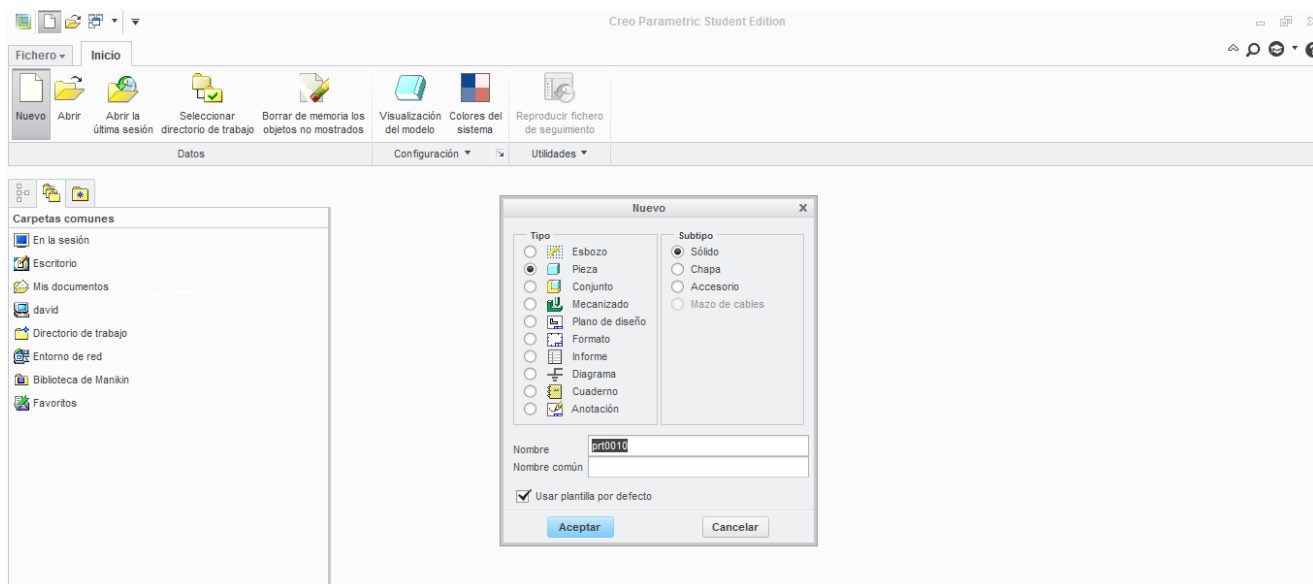


Figura 3.19

Posteriormente ya aparecerá en la pantalla la imagen en la que se empezará el boceto, que posee muchas opciones y formas de hacer los sólidos. En este caso se procedió realizando un esbozo en el plano X-Z y un posterior barrido que recorrería la forma de la pieza, ya que la aplicación de barrido es la más óptima para conseguir la geometría que se deseaba. Esta aplicación debe tener un esbozo primero para poder realizarse.

Por tanto se seleccionará esbozo, y se definirá el plano en el que se está trabajando. Al estar ya centrados en ese plano, se procederá a construir líneas guías, que no se crearán en nuestro modelo y servirán de referencia. Esto se consigue seleccionando el modo de construcción antes de dibujar nada y se observará que la línea que se crea a partir de entonces, será una línea de puntos y no una línea completa.

Se dibujan tres líneas paralelas y horizontales a una distancia de 0.115 mm de separación entre ellas. Esta distancia será el grosor de la fibra, la cual se ha sacado de los artículos científicos, [5], [8], [10], [11], [13], [14]. Este primer paso se observa en la figura 3.20

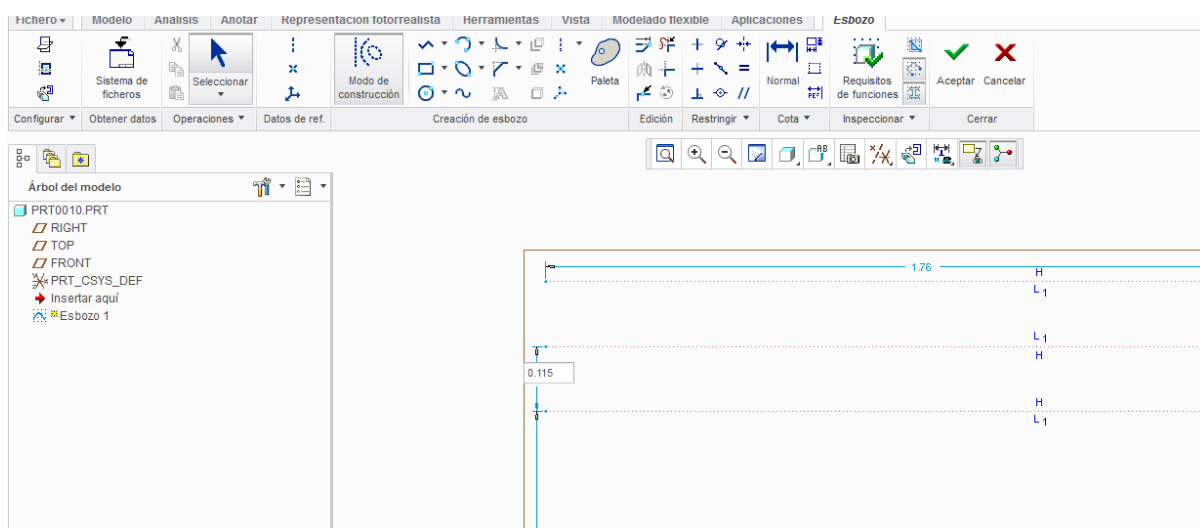


Figura 3.20

Estas líneas son necesarias, ya que se va a hacer un dibujo esquemático de perfil de cómo quedaría la fibra, es decir entre las dos líneas guía de arriba se observará la sección “elíptica” de una fibra, mientras que entre las dos líneas guía de abajo estará la sección de la otra fibra, lo que desembocará en la curvatura de la fibra con ese perfil característico de una onda.

El segundo paso entonces, será dibujar las dos elipses, cuyas medidas serán: eje mayor 0.5 mm y eje menor 0.115 mm, y tangentes a dos de las rectas para así dejarlas encuadradas en un espacio fijo y que no se desplacen cuando se les vaya aplicando más restricciones. También se ha leído que la distancia entre 2 fibras que siguen el mismo patrón es de 1.49 mm, [5], [8], [10], [11], [13], [14]. Por tanto, en nuestro caso que las elipses serán de fibras que van en patrón opuesto, será de 0.745. Todo esto se puede observar en la figura 3.21

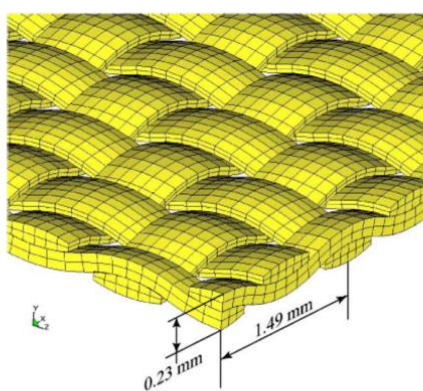
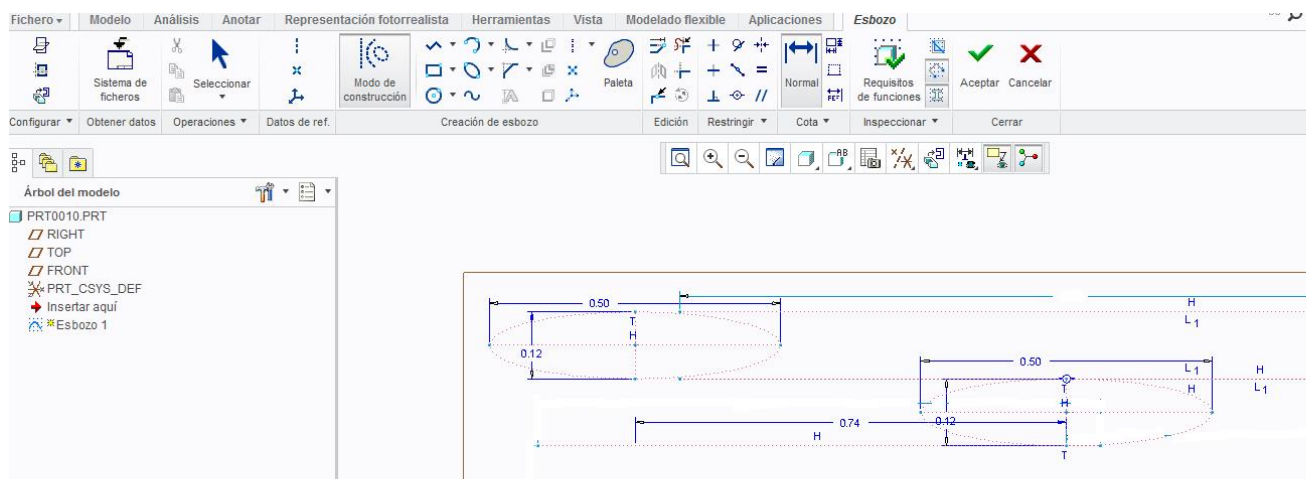


Fig. 2. Details of the quarter symmetric 3D finite element mesh of the initial geometry shown in Fig. 1.

Figura 3.21

Una vez se tengan ya las dos secciones de las fibras, se comenzará ya la construcción de lo que será el perfil de la fibra que se creará. Como en las secciones elípticas conseguir un contacto total será difícil de conseguir, se optó por 3 puntos de contacto. Esto se consiguió creando 2 líneas desde el centro de la elipse hasta las líneas horizontales de 30° .

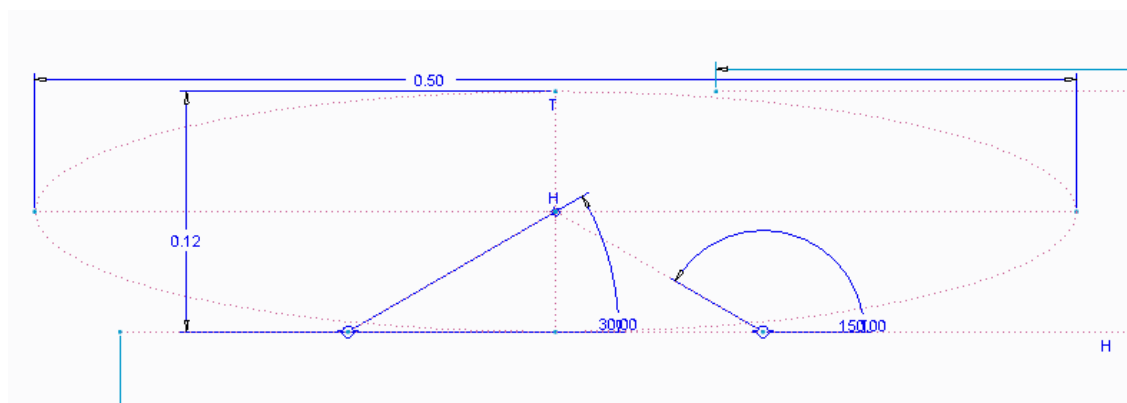


Figura 3.22

A continuación a partir de esos puntos de construcción que han aparecido en las líneas horizontales, se trazará una línea oblicua, tangente a la elipse y con destino las líneas horizontales. El resultado es el que aparece en la figura 3.23.

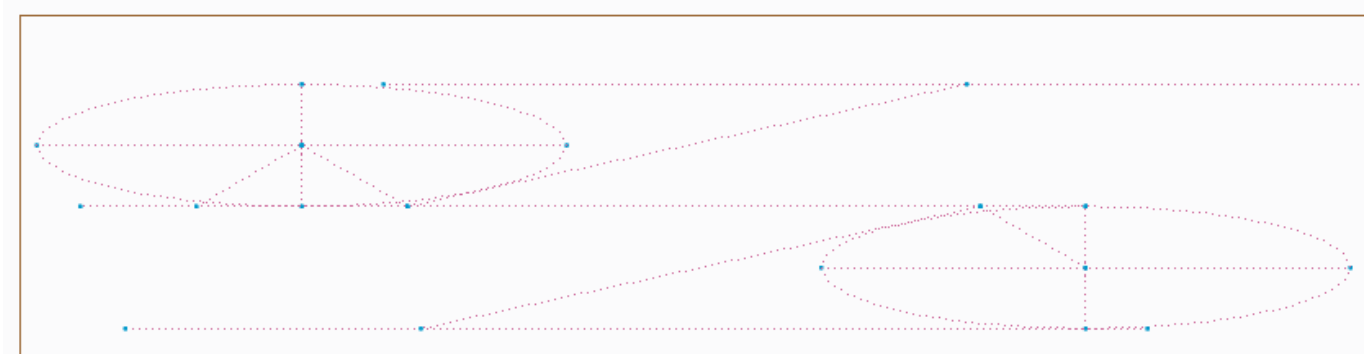


Figura 3.23

Por supuesto estas dos líneas deben ser paralelas, y conformarán el contorno de nuestra fibra. Se procederá después a suavizar las esquinas producidas por estas líneas con una aplicación que tiene “Creo” que se llama circular. Consistirá en seleccionar las dos líneas y aplicarles una unión circular para que se parezca más a la fibra real.

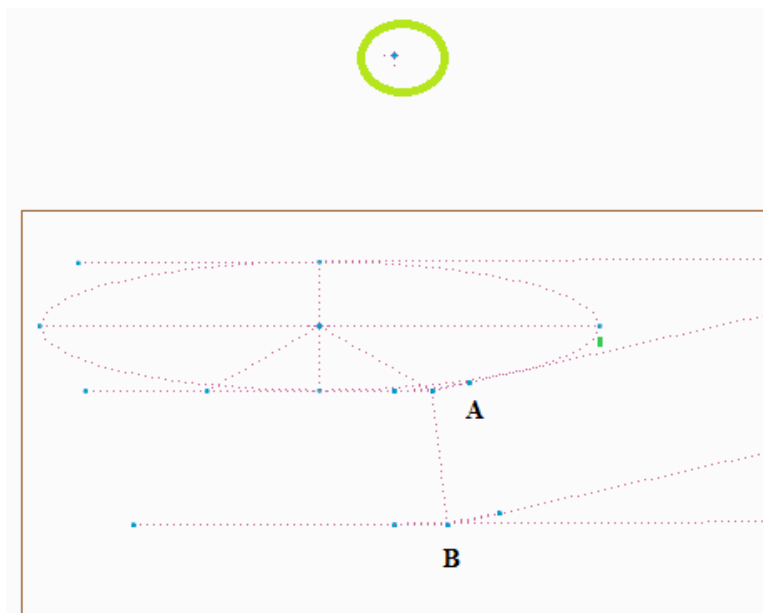


Figura 3.24

Una vez que se tengan hechas estas uniones circulares, para que la transición entre el lado pegado a la fibra y el opuesto (A Y B en la figura 3.24) sigan un crecimiento lineal, se debe hacer coincidir los centros de las 2 circunferencias que se habrían necesitado para su construcción. Este punto coincidente está remarcado en verde en la misma imagen.

Por último, una vez ya se tenga el perfil totalmente construido, como se observa en la anterior figura, se desactivará el modelo de construcción y ya sencillamente se crea una línea (que luego será la que recorra el barrido creando la fibra), que vaya del centro de una elipse hasta el centro de la otra. También se deberán realizar las uniones circulares y hacerlas coincidir con los centros como se ha explicado anteriormente. El resultado se expone en la figura 3.25.

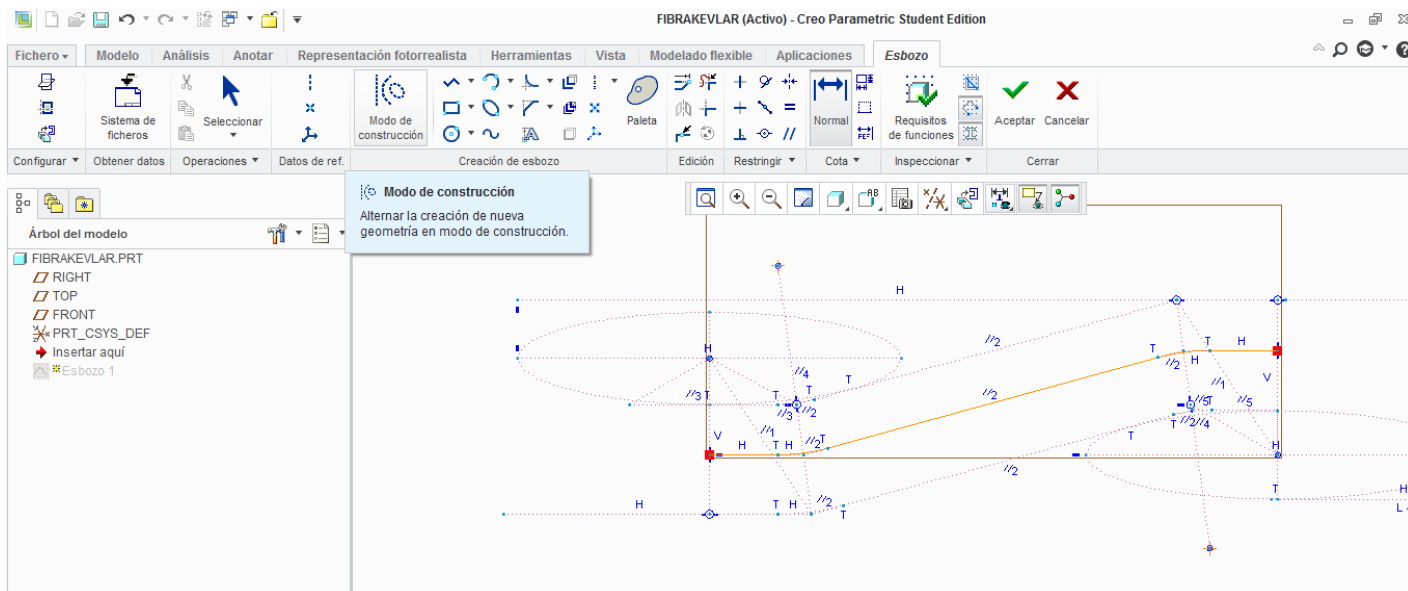


Figura 3.25

Como se puede observar en la imagen anterior, se debe mantener todas las restricciones como las de paralelismo y las de tangencia para que, más tarde en el barrido y al formar el conjunto, las partes encajen y sean tangentes y no se superpongan.

Después se pasará al segundo paso, el barrido. Una vez seleccionado el barrido, se pedirá una dirección de barrido, dónde se utilizará el esbozo que se acaba de describir y posteriormente se pasará a dibujar la sección de la fibra. Se esbozará una elipse de eje mayor 0.5 mm y de eje menor 0.115 mm, para su posterior recorte, ya que la fibra no tiene exactamente una sección elíptica sino que sus bordes son planos. La sección de la elipse será la siguiente:

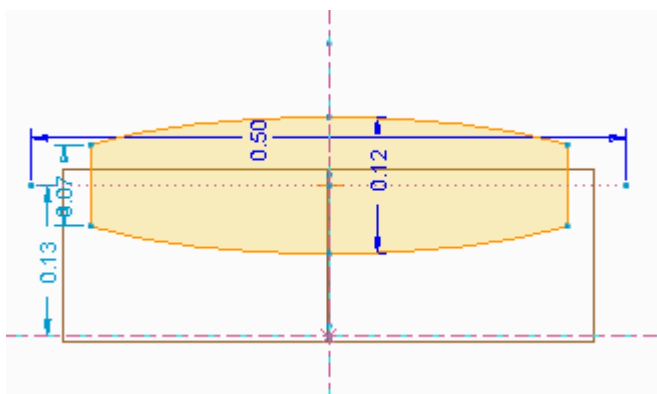


Figura 3.26

Una vez se tenga la sección se aceptará el barrido consiguiendo definitivamente la pieza deseada.

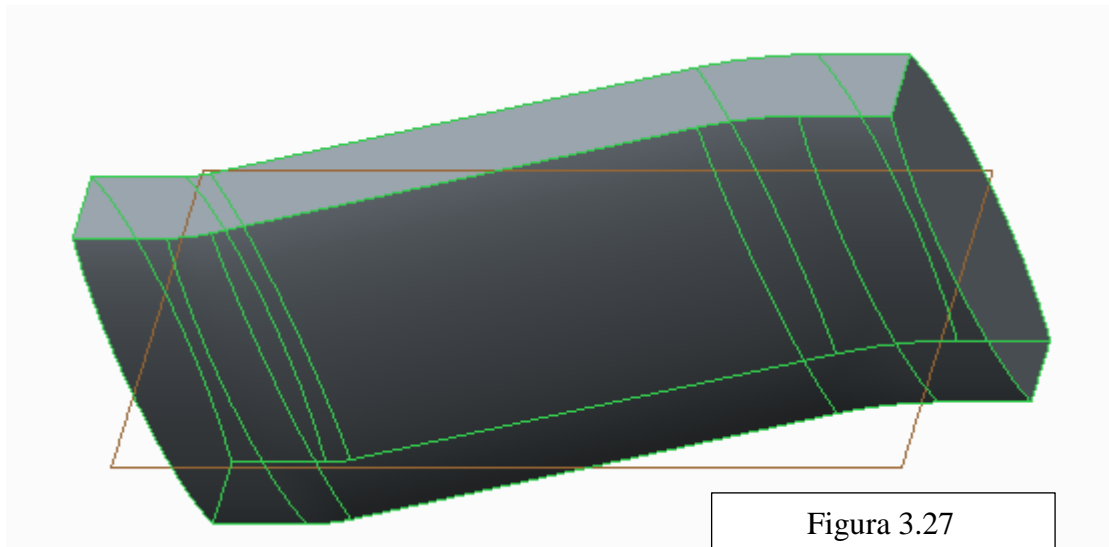


Figura 3.27

3.4.2 Conjunto.

Una vez guardada la pieza, se deberá abrir de nuevo el programa “Creo Parametric” pero esta vez en lugar de seleccionar pieza, se seleccionará conjunto. De esta manera se podrá introducir varias piezas y colocarlas con las restricciones. En nuestro caso, la separación de fibras y la tangencia entre ellas.

Primero, cuando el apartado de conjunto esté abierto se debe seleccionar “montar”, y buscar la pieza anteriormente guardada. Aparecerá la pieza y a esta primera no se la debe realizar ninguna restricción. Es decir se dejara en su sitio y la fijará para que así las restricciones que se ponga a las posteriores piezas no le afecten.

A continuación se montará la segunda parte, a la cual se la pondrán 3 restricciones: A) paralelismo de caras opuestas (en verde en la figura 3.28), B) distancia de 0.74 y C) coplanarias en su plano de sección, lo que se traduce en distancia=0.

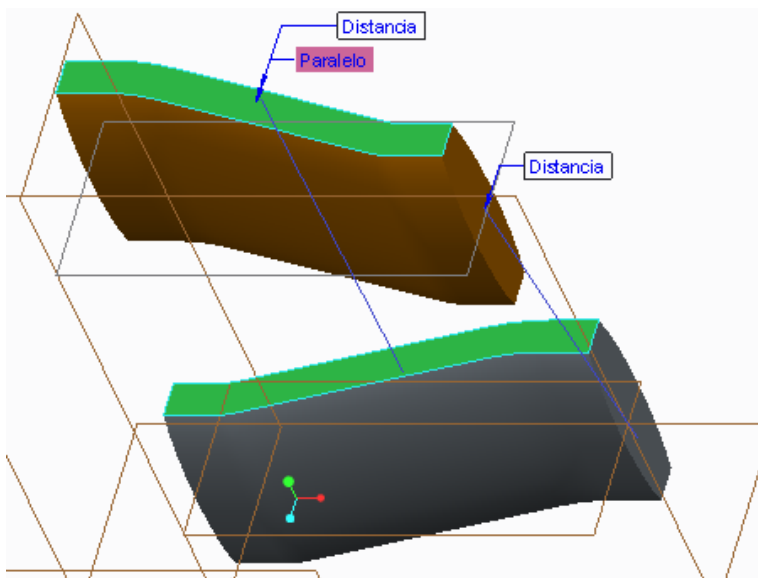


Figura 3.28

Se sigue este mismo procedimiento para las otras dos piezas, es decir separándolas 0.74 mm, su coplanariedad y su paralelismo de caras, además se debe añadir una restricción más, la tangencia entre las superficies, para conseguir en Abaqus un modelo de contacto lo más parecido a la realidad posible. Con todas estas condiciones se consigue un conjunto que será una tela de fibras sólidas 2x2.

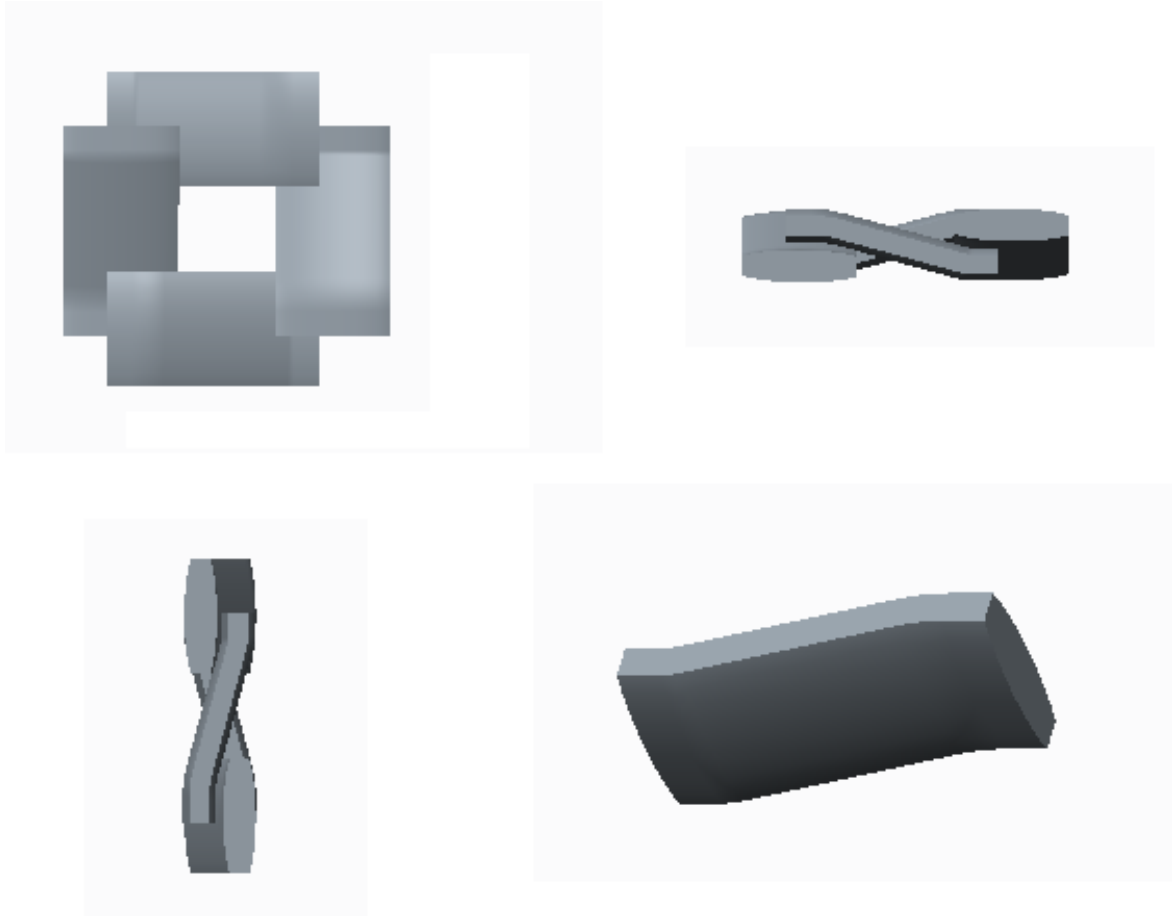


Figura 3.29

La figura 3.29 será el resultado final del conjunto que posteriormente se guardará como un archivo .igs que será importado a Abaqus para su utilización en el análisis en la simulación.

Se demuestra entonces, que el uso de este tipo de programas que permiten modelizar sólidos, con geometrías y formas de gran dificultad, para volcarlos después en softwares de Elementos Finitos, son de una gran utilidad y han sido esenciales en la consecución de este proyecto.

(página en blanco a propósito)

4. Modelo definitivo.

A continuación se describe la modelización definitiva, resultado de los ensayos anteriores.

4.1 Partes.

Se procede a la importación de fibras modeladas anteriormente como sólidos, o al menos la parte en la que ocurrirá el impacto. Eso es lo que se ha hecho en este ensayo, utilizando el conjunto resultado del epígrafe 3.4.

Después de su creación, se debe guardar este conjunto como un archivo IGS para su posterior importación a Abaqus. Esto se realiza, utilizando la opción “import part” y seleccionando nuestro archivo IGS. Hay que tener cuidado porque a veces esta importación se realiza con defectos y solo nos transporta las superficies de nuestro diseño y no completo como se desea, por esta razón se debe realizar un corte en nuestra figura para comprobar que son sólidas. Por tanto la primera parte será la que aparece en la figura 4.1.

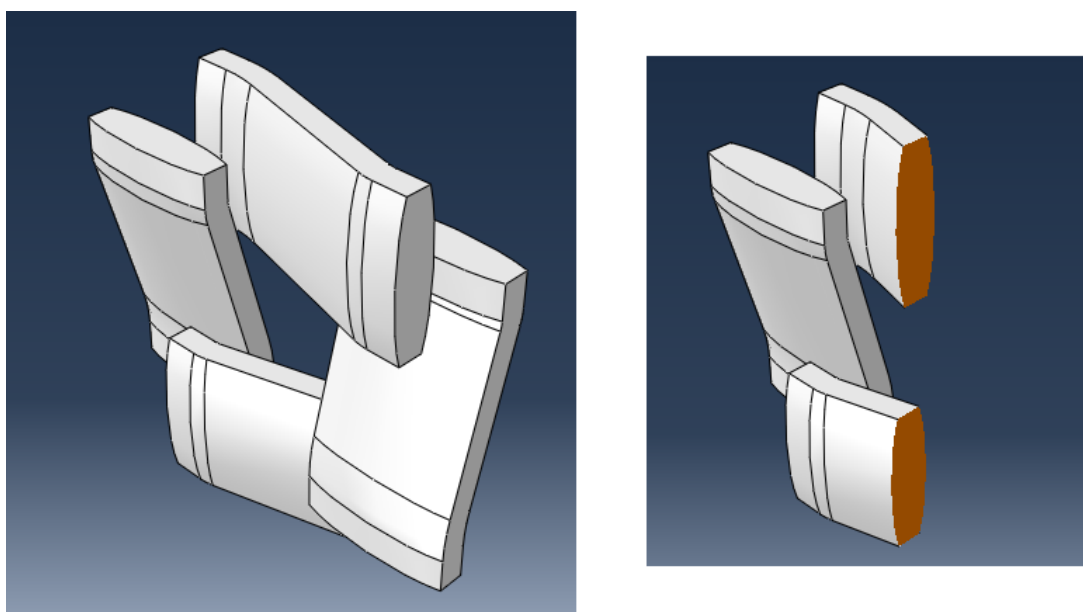


Figura 4.1

Se observa en la zona derecha de la figura que sí es un sólido, como se deseaba. Estas 4 piezas unidas en forma de conjunto permitirán, mediante una unión posterior, la simulación de fibras.

Las dimensiones de la sección del conjunto son las mismas que en el epígrafe 3.4, que se recuerdan en la figura 4.2. Y la separación entre partes opuestas también se mantienen, es decir una separación entre fibras opuestas de 0.74 mm.

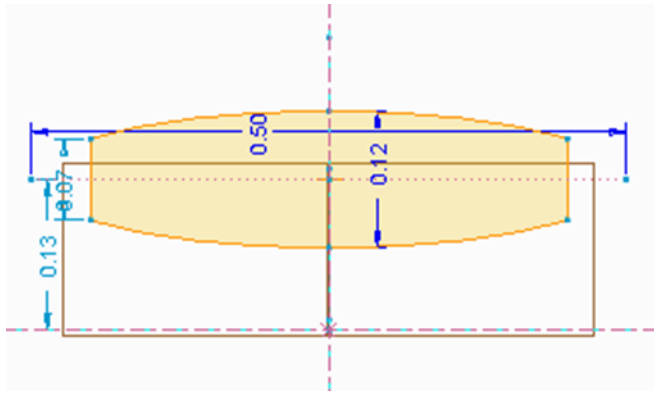


Figura 4.2

Se debe tener en cuenta, que con el conjunto que se tiene no se completaría las uniones de las fibras y se dejarían espacios, es decir que se necesita también una parte de fibra para poder moverla libremente y completar bien el diseño. Por tanto, se debe realizar otra importación de una única pieza del conjunto. Siguiendo los mismos pasos citados anteriormente se tendrá la segunda parte.

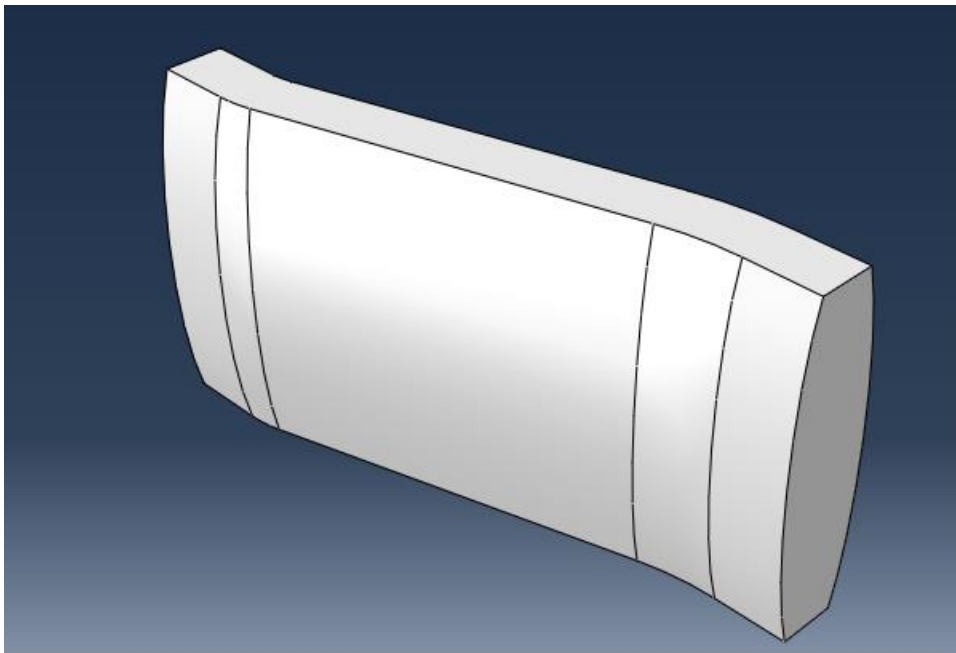


Figura 4.3

No se debe olvidar la comprobación de que se trata de un sólido y no solo de cascaras de superficies.

La tercera parte necesaria en el modelo, será por supuesto el proyectil. El cual se diseñó íntegramente en Abaqus, como revolución de sólido deformable (figura 4.4) y de un diámetro de 5.556 mm que es una medida que se utiliza en los artículos consultados, [11], [12], [13], [14] y además es la medida del artículo que se va a reproducir.

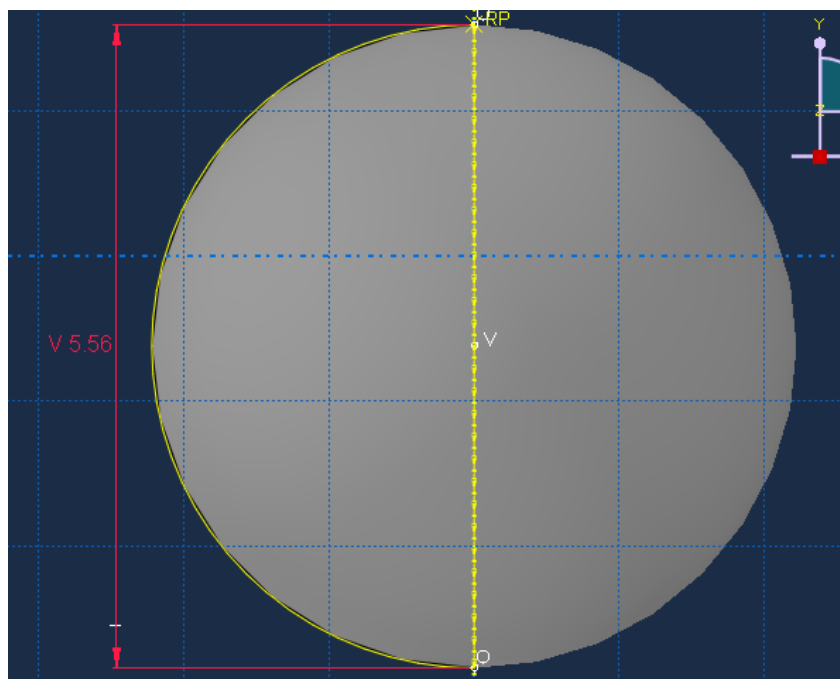


Figura 4.4

Una vez se tenga dibujado este boceto se procederá a la revolución de 360° obteniendo así nuestra bala en la figura 4.5, a la que posteriormente se le colocará un punto de referencia donde se aplicará la velocidad de impacto.

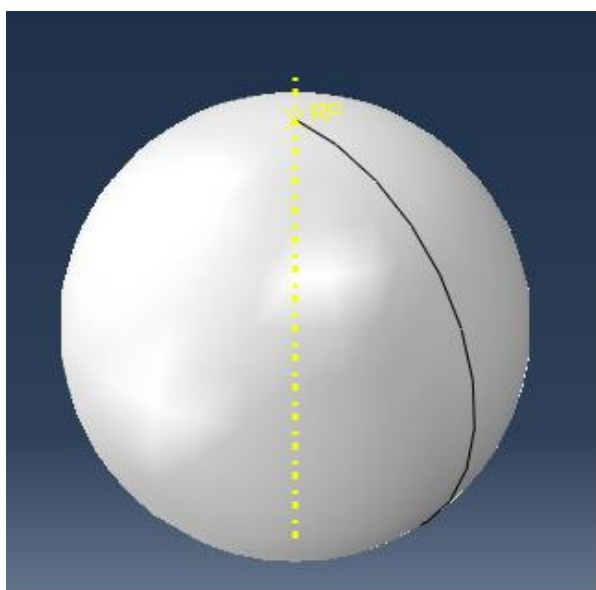


Figura 4.5

A continuación conviene aclarar que la simulación precisa de una gran cantidad de memoria y muchos cálculos a realizar. Por tanto, se decidió que la parte diseñada como sólido debería ser tres veces más grande que el diámetro del proyectil, es decir de unos 16 mm para que la influencia a partir de este punto fuese mínima y así poder diseñar el resto de la tela como fibras tipo Shell, los cuales ahorrarían una gran cantidad de tiempo en cálculos.

Por tanto, las dos últimas piezas fueron dos rectángulos sin espesor (Shell) cuyas dimensiones se aprecian en la siguiente figura:

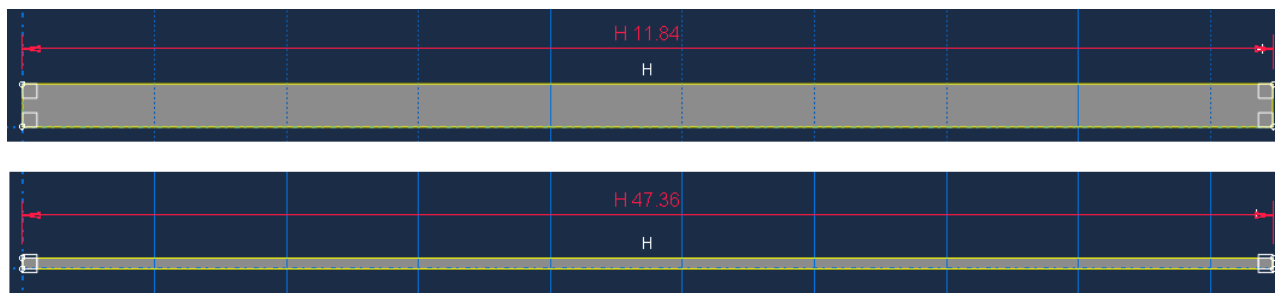


Figura 4.6

Las dimensiones que aparecen en la figura 4.6 están en milímetros.

La explicación de que se necesiten dos rectángulos, es que uno de los rectángulos se unirá a la parte sólida, el más corto, y recorrerá 1/3 de la distancia de nuestra tela, mientras que el rectángulo largo tendrá que hacer todo el recorrido, la parte sólida y las dos partes que ocupará la Shell. En la figura 4.7 se puede observar un esquema.

Los rectángulos dibujados en rojo harán el papel de fibra corta, mientras que los que están en verde serán los que realizarán el papel de fibra larga. El cuadrado sólido tendrá dimensiones de 23.68x23.68 mm, lo que resultará en una tela de fibras de 47.36x47.36 mm.

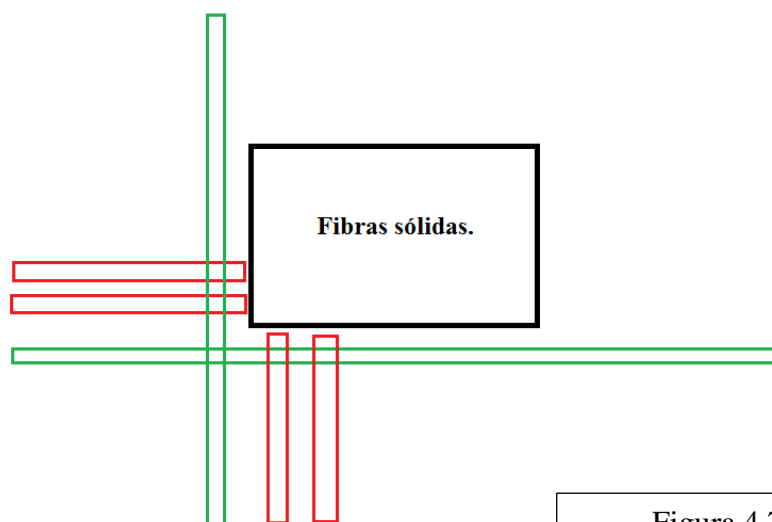


Figura 4.7

4.2 Materiales.

A continuación se va a proceder a explicar las propiedades de los materiales que se usan en la simulación. Para comenzar, el material usado para el proyectil se va a suponer plomo, mientras que el de la tela será la fibra de aramida.

Las propiedades del plomo utilizadas son las siguientes:

Módulo de Young.	E	5.5 MPa
Poisson.	γ	0.44
Densidad.	ρ	$7.7 \times 10^{-9} \text{ Ton/mm}^3$

Tabla 3

En el apartado de densidad se seleccionó la cifra que aparece en la anterior tabla porque los artículos utilizados en la comparación de resultados, [11], [12], [13], [14], afirman que todos los proyectiles independientemente del tamaño y forma van a tener una masa de 0.692g, y puesto que se conocen las dimensiones del proyectil:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{0.000692 \text{ Kg}}{\frac{4}{3} \times \pi \times (0.002778 \text{ m})^3} = \frac{0.000692 \text{ Kg}}{8.9801 \times 10^{-8} \text{ m}^3} = 7705.927 \text{ Kg/m}^3$$

$$7705.927 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times \frac{1 \text{ Tonelada}}{1000 \text{ Kg}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1 \times 10^9 \text{ mm}^3} = 7.7 \times 10^{-9} \text{ Ton/mm}^3$$

Una vez se seleccionen las propiedades de la bala, se procede a definir las de la aramida. Para ello se deben seleccionar adecuadamente las propiedades más repetitivas y que sean más asequibles de conseguir evitando subrutinas, que harían mucho más complicado y largo la realización de esta simulación.

Casi todos los artículos concluyen que la densidad de la fibra de aramida es 1440 Kg/m^3 . Para su elasticidad, se seleccionó uno de los artículos que se quería reproducir, [13] y se siguieron las mismas características que se indican en él:

“Experimental studies indicate the tensile modulus of 600 dernier Kevlar KM2 yarns is 82.6 GPa. Considering homogenized nature of the yarn FE model, in order to account for the actual filament-level yarn architecture this number needs to be adjusted by the respective filament volumen fractions. Following the procces outlined. This homogenization results in a longitudinal elastic modulus of 62.8 GPa (wrap) and 55 GPa (fill).”

Traducido significa que el módulo de Young del Kevlar KM2 es 82.6 GPa, pero que en el ensayo se considera el material homogéneo y no ortótropo (como en el ensayo que se está realizando) y que considerándolo homogéneo las fibras tendrán un módulo de 62.8GPa las verticales y las horizontales 55 GPa.

También se seleccionaron las propiedades plásticas que más se podían acercar al comportamiento experimental de la aramida. Con lo que se llegó a las propiedades definitivas que se usan en la simulación y son las siguientes:

- Densidad, $\rho = 1.44 \times 10^{-9} \text{ Ton/mm}^3$
- Módulo de Young y Poisson, $E = 60 \text{ GPa}$ y $\gamma = 1 \times 10^{-9}$
- Plasticidad en tabla:

Data		
	Yield Stress	Plastic Strain
1	540	0
2	957	1.058
3	1420	1.1868
4	1880	1.295

Tabla 4

4.3 Secciones.

Este módulo del software Abaqus se utiliza para poder asignar los materiales definidos anteriormente a las piezas o partes. En el caso a estudiar se van a utilizar tres secciones diferentes:

- Para las fibras sólidas.
- Para las fibras tipo Shell.
- Por último la sección que aportará material al proyectil.

La sección de las fibras sólidas se deberá seleccionar como sólido homogéneo, para que se distribuyan las propiedades del material seleccionado por todo nuestro sólido.

Para la sección del proyectil, también se seleccionará sólido homogéneo por la misma razón, aunque posteriormente se considerará la bala como un sólido rígido que no sufrirá deformación alguna.

Para acabar este epígrafe, la sección se seleccionará como Shell continuo y homogéneo y con un espesor de 0.115mm. Esto se elige así para que cuando se unan la parte Shell y la sólida se indique a Abaqus que esa parte Shell es en realidad un sólido de ese espesor (figura 4.8).

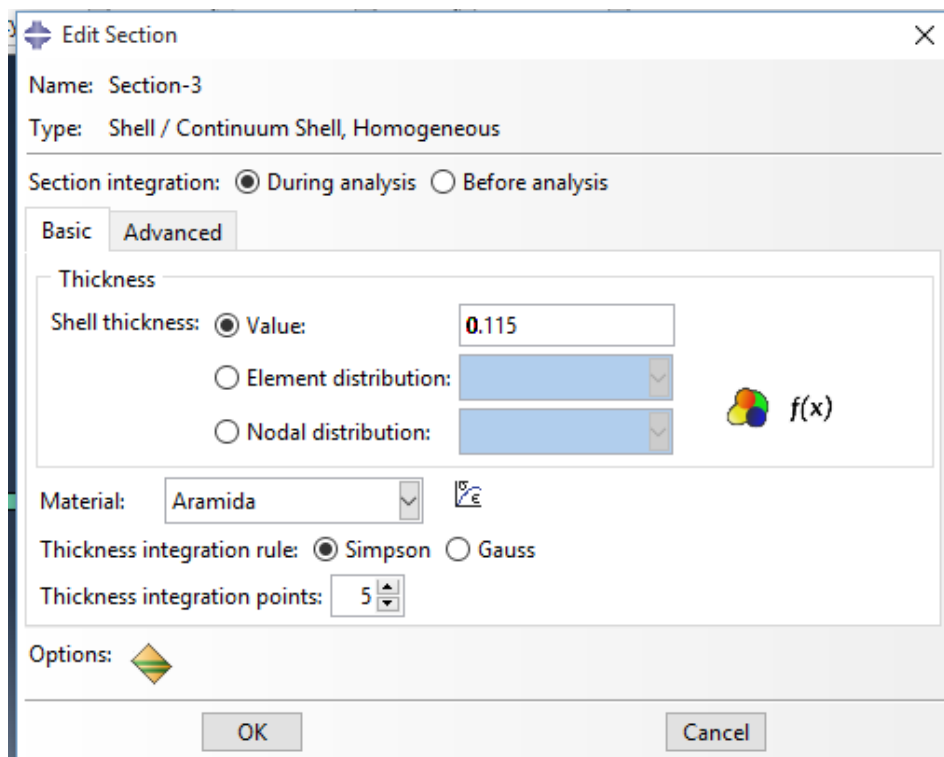


Figura 4.8

4.4 Ensamblaje de piezas.

Este epígrafe es el que mayor relevancia tiene en cuanto a la preparación de la modelización, puesto que conforma la forma definitiva de la tela y se comprobaba su composición mediante los cálculos de las secciones y longitudes.

El primer paso consiste en crear las instancias del conjunto y de la pieza única para empezar la colocación. Se harán 4 copias del conjunto y se colocarán de la siguiente manera:

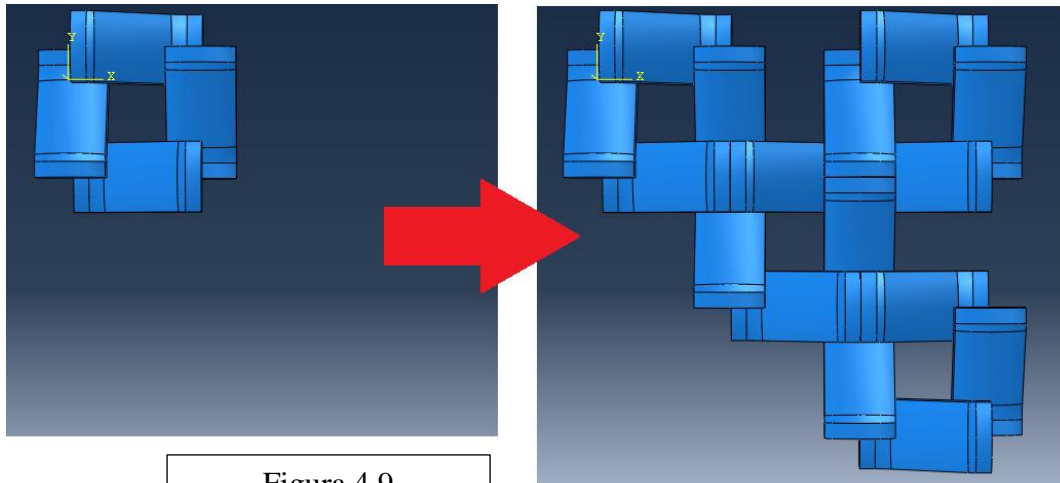


Figura 4.9

Se puede observar, que el objetivo será conseguir una tela 4x4 para empezar a multiplicarla tantas veces como se necesite. Después de este paso se colocarán las piezas únicas rellenando los huecos que faltan hasta llegar a una tela 4x4. El resultado final se observa en la figura 4.10.

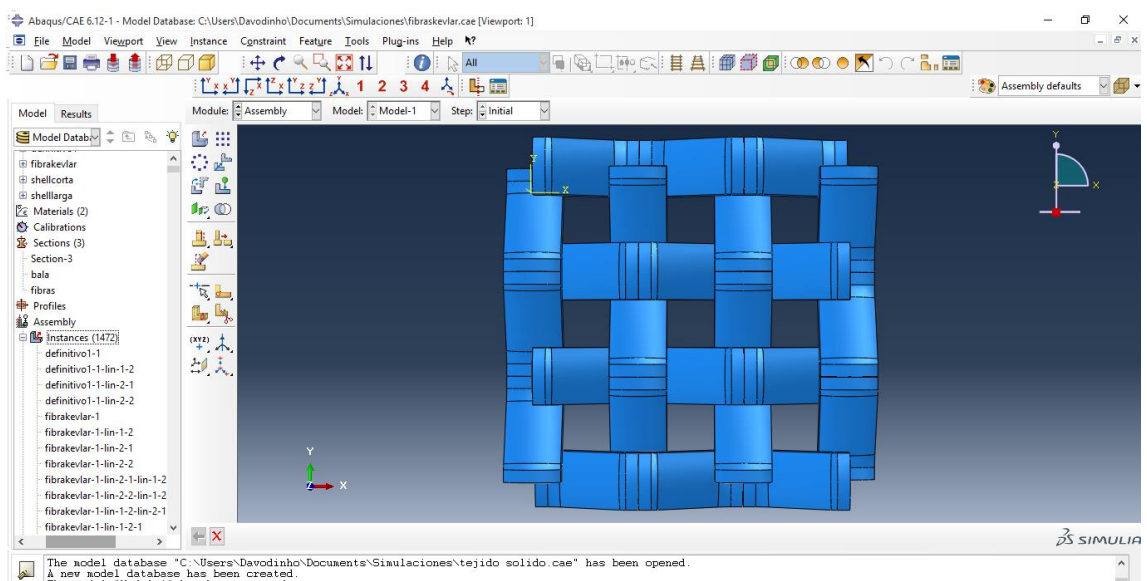


Figura 4.10

Una vez obtenida esta tela 4x4, se procede a multiplicarla linealmente, con su posterior unión hasta conseguir una tela sólida de 32x32, y sabiendo que la distancia entre fibras es 0.74mm se llega a la dimensión mencionada en el epígrafe 4.1, de una malla sólida de 23.68 mm, que será superior a tres veces el diámetro del proyectil, y por tanto la influencia del impacto sobre las fibras Shell no será apenas apreciable.

En la figura 4.12 se aprecia el resultado de esta tela de fibras sólidas sobre la cual impactará el proyectil.

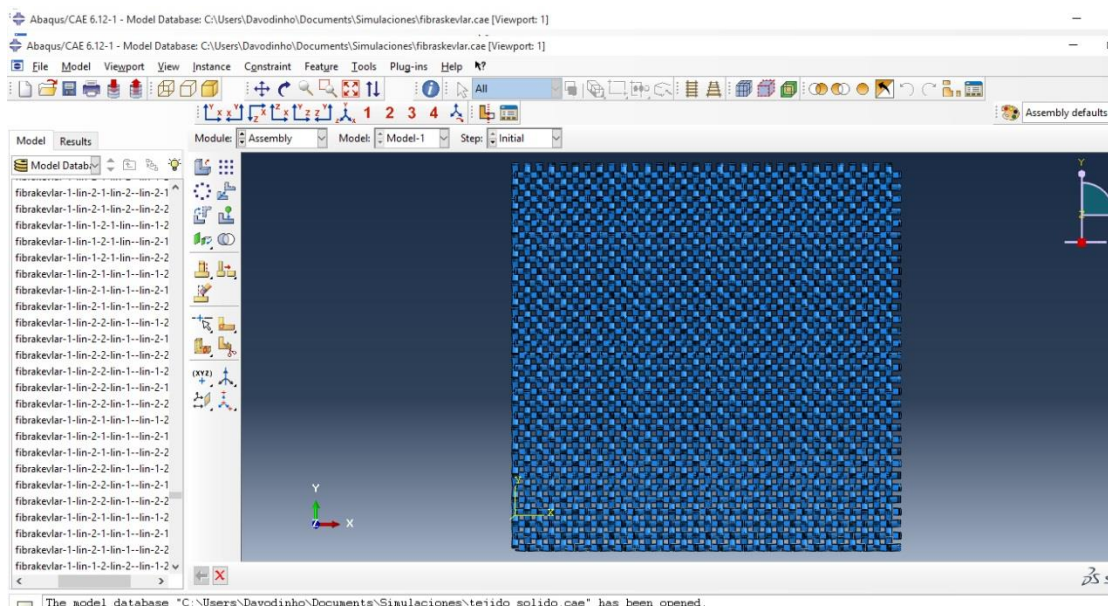


Figura 4.11

A continuación se creará la instancia de la fibra Shell corta y se colocará pegada y en el centro de la fibra sólida como se aprecia en la siguiente imagen.

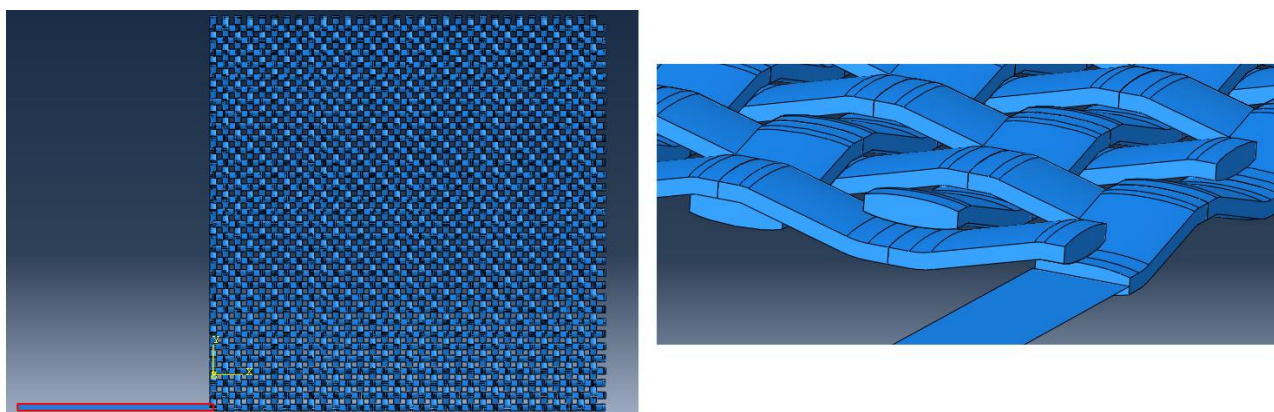


Figura 4.12

Cuando la fibra esté colocada en su posición se procederá a su multiplicación lineal con distancia de 0.74. Después de colocar todas las fibras Shell cortas en su posición, este será el resultado.

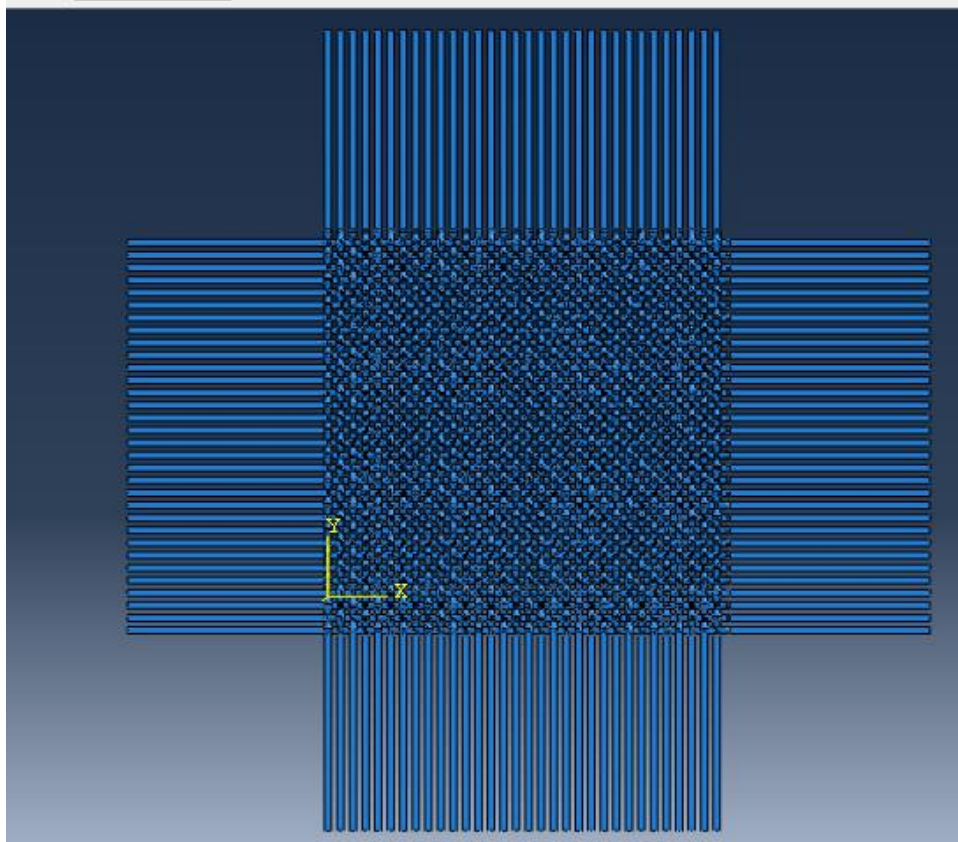


Figura 4.13

Se comprueba que los cálculos han sido correctos, puesto que al proceder a la multiplicación linealmente de la fibra Shell, estas se colocan correctamente y no es necesaria su modificación posterior.

A continuación, lo que se debe hacer es rellenar los espacios con las fibras Shell largas, colocando 16 fibras más por cada lado con una distancia de 0.74 cada una, consiguiendo así la malla de tela de 64x64 fibras y de dimensiones 47.36 mm.

Posteriormente, se colocará la bala esférica en el medio de la tela con su punto de referencia lo más cercano a la tela y ya se habrá terminado el proceso de ensamblaje. El resultado final se puede observar en las siguientes 2 imágenes.

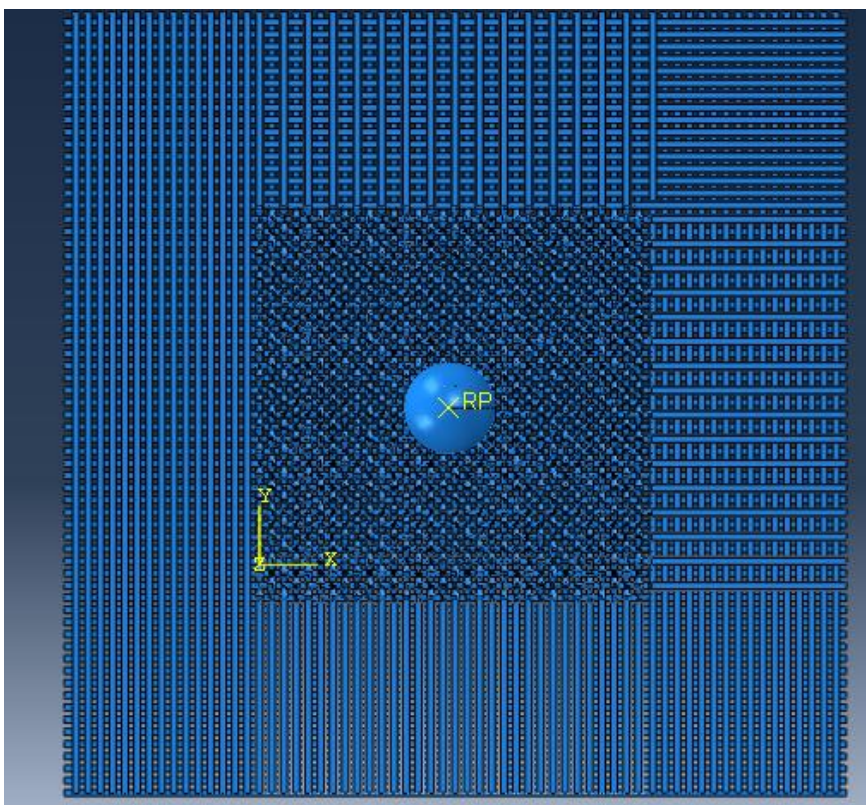


Figura 4.14

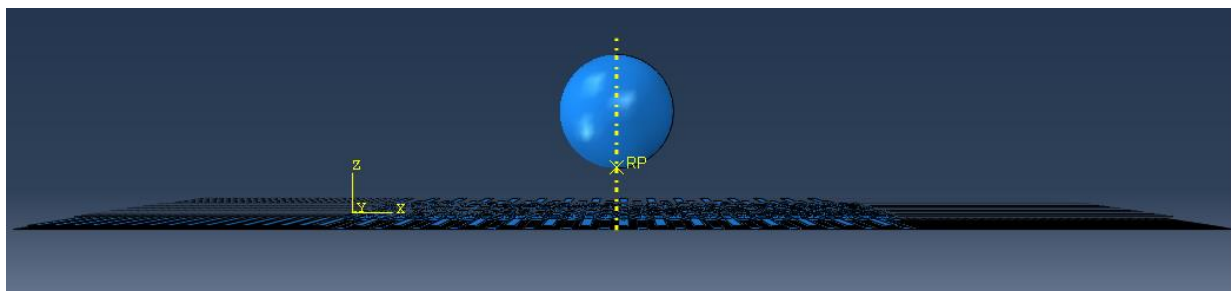


Figura 4.15

4.5 Step y variables a tener en cuenta

El módulo step del programa Abaqus, es definido por el tiempo que se desea que dure nuestra simulación y por la manera de contabilizarlos. En la mayoría de informes y artículos que se han tratado sobre impactos, los tiempos de medida van desde los 2 μ s hasta los 200 o 300 μ s.

Para esta simulación, se seleccionó en el apartado de step tipo dinámico y explícito, ya que la simulación trataba de un impacto, y se le configuró un tiempo de step máximo de 300 μ s.

Una vez seleccionado el periodo de tiempo en el que se va a prolongar la simulación, se prosigue en el módulo “Field output requests”, en el cual se seleccionarán las variables que se necesitan o se desean tener en cuenta y observar su evolución a lo largo de ese periodo de tiempo.

En la simulación a realizar, no es necesaria una gran cantidad de variables, eso es significativamente bueno ya que se ahorrará una gran cantidad de memoria y los cálculos que se deberán hacer serán muchos menos.

En el caso a estudiar se seleccionaron las siguientes variables a tener en cuenta.

- **Tensiones:** S. La tensión de Von Misses
- **Deformaciones:** PE. Deformación plástica de componentes.
- **Desplazamientos y velocidades:** U, V. Traslaciones y rotaciones, y la velocidad de esas traslaciones y rotaciones respectivamente.
- **Estado:** STATUS. Es la variable más importante de todas las seleccionadas, ya que será la que permita eliminar de la simulación los elementos que superen el criterio de fallo seleccionado. Si esta variable no se seleccionase, los elementos que superasen el criterio de fallo no desaparecerían del modelo y por tanto se obtendrían resultados negativos.

Otra de las opciones de este módulo es seleccionar la cantidad de imágenes que se desea que el programa nos muestre para ver la evolución del modelo. De serie el programa mostrará 5 diferentes capturas, pero para el caso estudiado y para comprender mejor lo que pasa se seleccionaron 30 capturas.

4.6 Interacciones y propiedades de las mismas.

Todos de ensayos consultados, pese a sus diferencias, coincidían en una cosa, el proyectil sufría un rozamiento al impactar con la tela, y las propias fibras entre ellas también tenían un coeficiente de rozamiento.

Para la simulación estudiada se consideró que aproximadamente la fricción entre la bala y las fibras y la fricción entre las fibras entre ellas iba a ser la misma, por tanto se utilizó un general contact, cuyas propiedades son:.

- Tangencial behaviour: de tipo penalti con coeficiente de rozamiento de 0.45
- Normal behaviour: Con hard contact

Una vez se tuvieron las propiedades seleccionadas, se eligió el módulo “interactions”, escogiendo la opción “general contact (explicit)”, en la cual se puede optar que todas las superficies contacten con todas utilizando la opción “All* with self”. A continuación se seleccionó la propiedad anteriormente explicada para que el contacto se realizara con esas propiedades.

4.7 Constraints.

En el siguiente epígrafe, se hablará de las uniones que se realizaron a las diferentes piezas para que actuaran como una sola fibra, así como, de considerar al proyectil como un sólido rígido y que no se deforme.

El primer paso se corresponde con agilizar el procedimiento de encontrar los contactos entre las piezas. Se encuentra en el módulo interacciones y se llama “find contact pairs” y es el icono que aparece a continuación.



En esta herramienta se permitirá seleccionar la distancia a la que se encuentran las piezas que se desean hacer contactar o unir, también se puede elegir si se quiere realizar esta búsqueda en todo el modelo o solo en partes específicas del mismo. Una vez se hayan seleccionado las pautas necesarias, se selecciona abajo a la izquierda “find contact pairs” y se espera a que aparezcan.

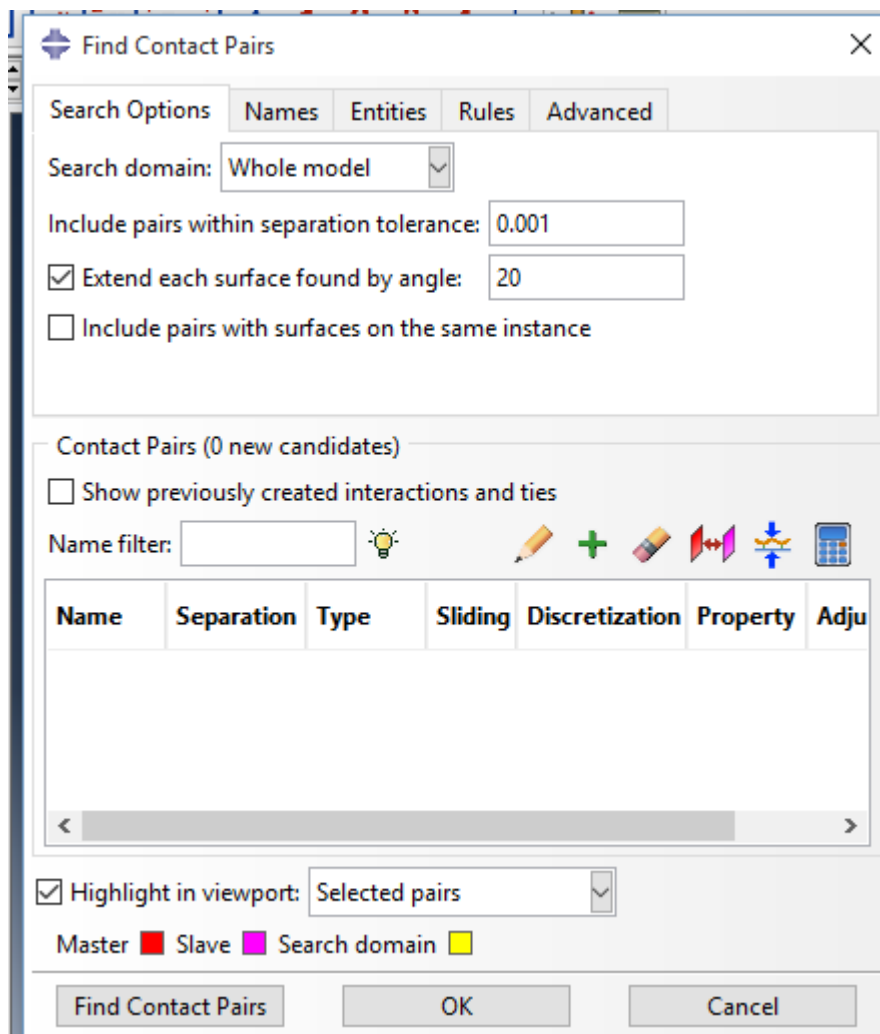


Figura 4.16

A continuación se deben juntar todos los contactos entre sólidos, en uno, para que todo sea más sencillo y seleccionarlos con el tipo “tie”. Este tipo de interacción hará que actúen como si estuviesen soldados entre ellos. La supuesta soldadura se producirá entre la superficie de la sección “elíptica” del sólido.

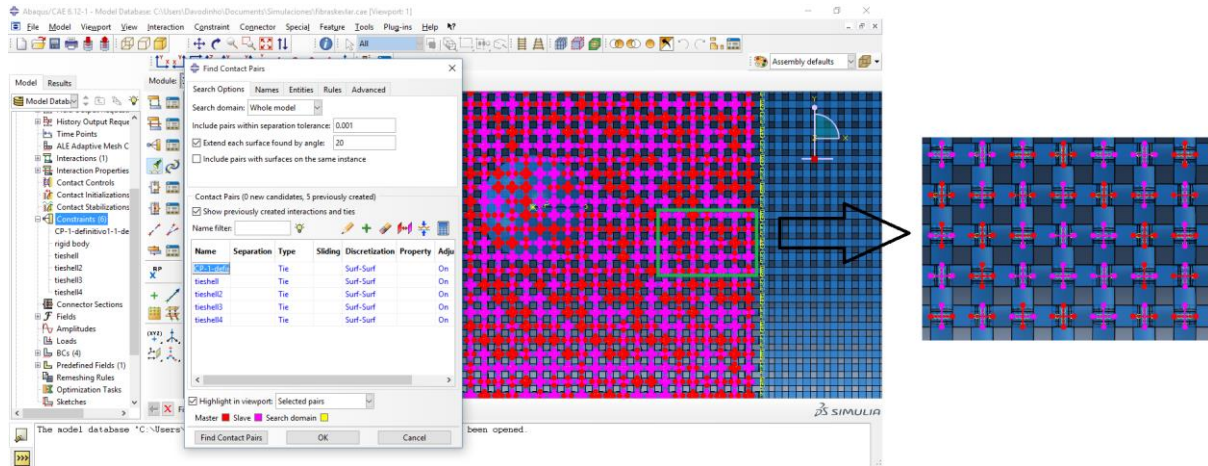


Figura 4.17

En la figura anterior se demuestra lo anteriormente explicado sobre el “tie” y se muestra cómo se ve en un zoom en la parte de la derecha de la imagen que los contactos se producen entre las superficies “elípticas”.

Este mismo contacto “tie” es el mismo que se debe colocar en las uniones sólido-Shell pero con la herramienta “find contact pair” no reconoce esto como contacto ya que se pasa de superficie a figura plana, es decir, que se deben hacer uno a uno seleccionando el módulo “constraints” tipo tie y se va seleccionando la superficie sólida que contacta con la línea de la fibra Shell.

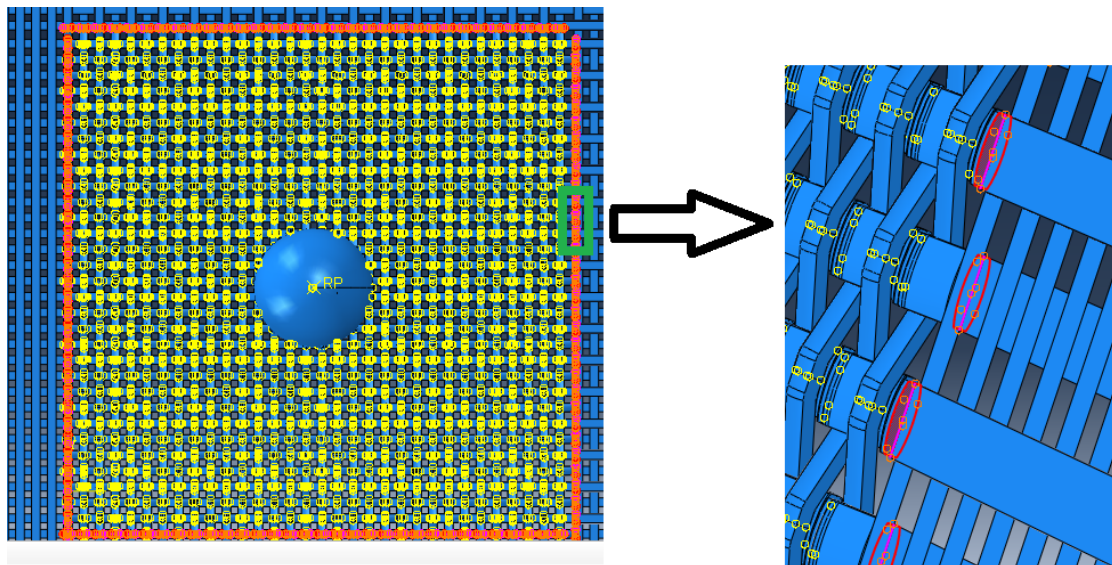


Figura 4.18

Después de colocar todos los “ties” ya se tendría finalmente la malla de fibras completa y deseada que actuaría como un conjunto y no como piezas por separado para la simulación.

Por último en este apartado se debe volver a seleccionar “constrains”, se seleccionará “rigid body”, y aparecerá un menú como el de la figura 4.19.

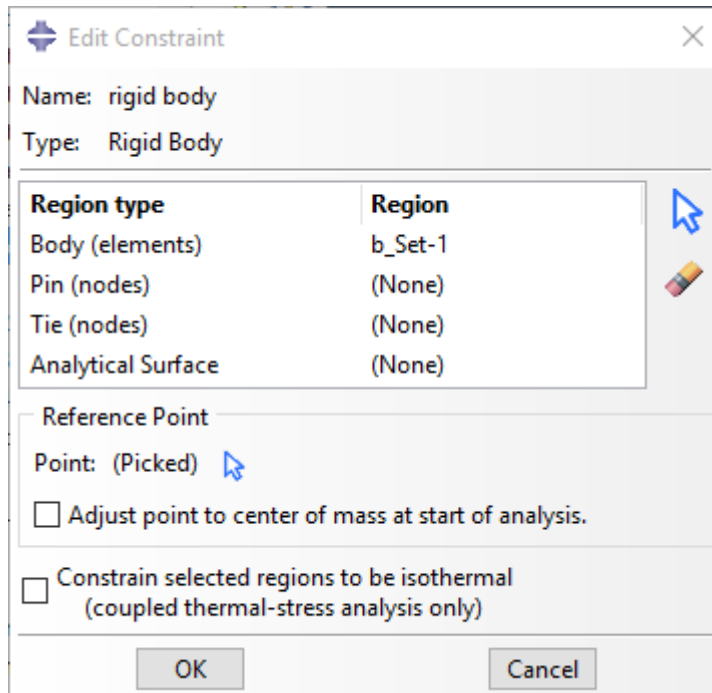


Figura 4.19

En dicho menú en el apartado “body” se deberá seleccionar el proyectil y en el “reference point” se seleccionará el punto de referencia que se colocó en la bala. Esto significa que toda la masa y características del material del proyectil quedarán referenciada a ese punto crítico.

Ya terminado este apartado se pasará al último que será aplicarle una velocidad al proyectil y colocar las condiciones de contorno para que la simulación se ejecute de la manera deseada.

4.8 Condiciones de contorno y velocidad.

Este último apartado del modelo definitivo tratará de las sujeciones que se simulan, así como, de la velocidad del proyectil.

Primero para las condiciones de contorno, se deberá hacer click en el apartado “BC’s” y aparecerá un menú como el siguiente.

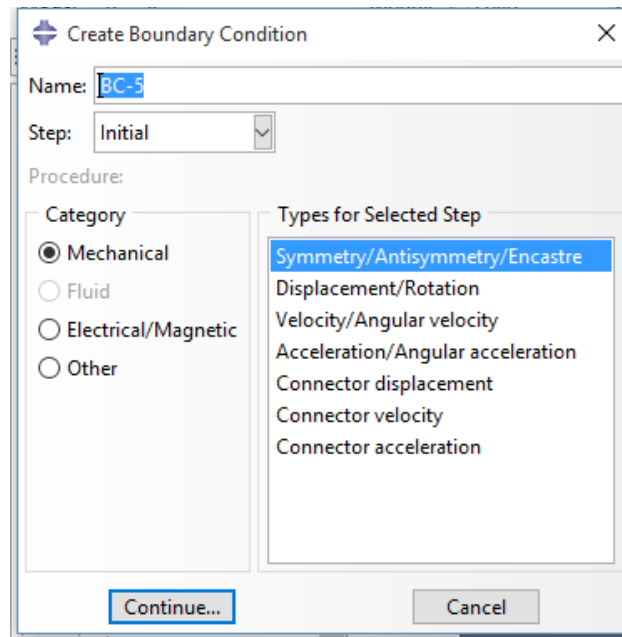


Figura 4.20

Se seleccionará, tal y como aparece en la figura 4.23, categoría mecánica y tipo simetría/anti-simetría/empotramiento. A continuación se irán seleccionando las líneas de las fibras Shell más alejadas de la parte sólida. Cuando se termine se aceptará y se seleccionará el tipo “encastre”, lo que significa que se empotrará la malla de tejido en sus cuatro extremos.

Y el segundo paso y último, será seleccionar “predefined fields” y seleccionar como en la siguiente imagen, categoría mecánica y tipo velocidad, y a continuación se le aplicará al punto de referencia.

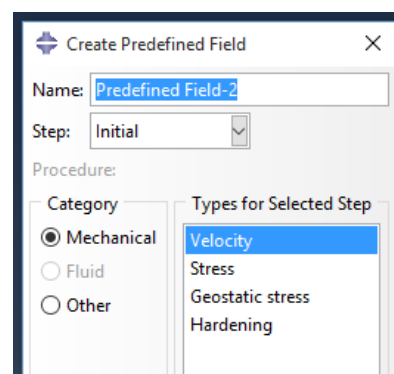


Figura 4.21

El modelo definitivo entonces quedaría de la siguiente manera.

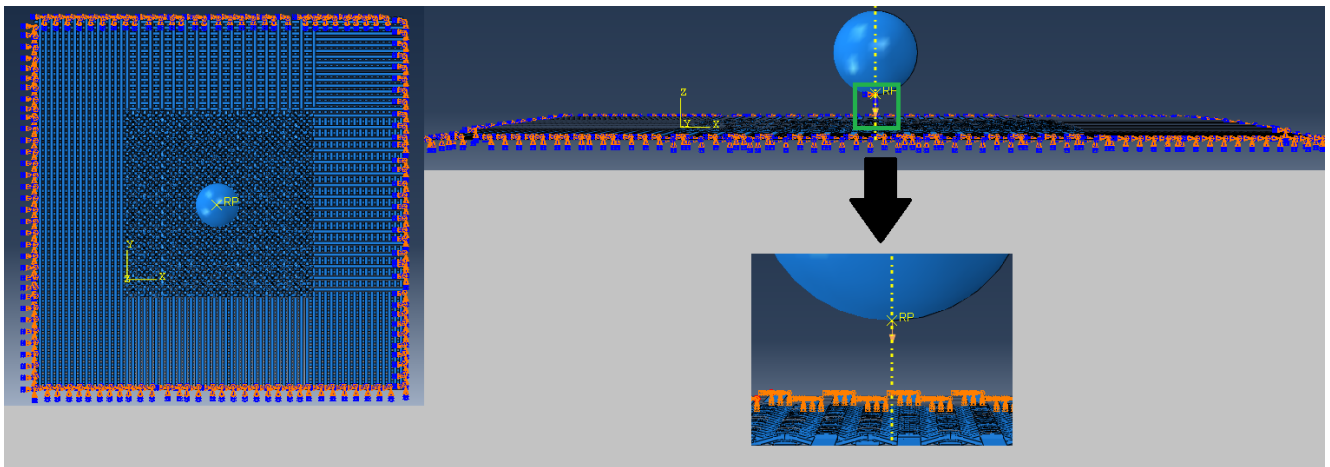


Figura 4.22

Se concluye el diseño del modelo definitivo caracterizado correctamente. Se continúa por tanto a comenzar la simulación para la obtención de los resultados y su posterior discusión.

5. Resultados.

Para comenzar el siguiente epígrafe, es necesario volver a recordar, que para la validación de estos resultados se han tomado las propiedades y datos de documentos científicos publicados en diferentes plataformas. Los tres documentos en los que principalmente se apoya este estudio, se corresponden con:

- Artículo de Gaurav Nilakantan, John W. Gillespie Jr. Publicado en 2012 [11]
- Artículo de Gaurav Nilakantan, Eric D. Wetzel, Travis A. Bogetti, John W. Gillespie Jr. Publicado en 2012. [12]
- Artículo de Gaurav Nilakantan, Eric D. Wetzel, Travis A. Bogetti, John W. Gillespie Jr. Publicado en 2013. [13]

Estos tres documentos fueron los que se seleccionaron para comparar la validación de resultados puesto que los tres utilizan las mismas telas de fibra de aramida y un proyectil idéntico y unas condiciones de contorno iguales a las propuestas en este documento.

Una vez hecha esta aclaración, se prosigue a la discusión de resultados.

La velocidad seleccionada de los tres documentos para la comparación del modelo fue la de 50 m/s. y en las siguientes figuras se observan los valores de los diferentes ensayos a esta velocidad. La figura 5.1 pertenece a los datos sacados del artículo [12]. Los datos de la figura 5.3 pertenecen al artículo [11] y por último la figura 5.2 son los datos del último artículo mencionado anteriormente.

Shot #	Large sphere				
	V_i (m/s)	V_r (m/s)	N_w	N_f	N_{tot}
1	30.00	–	–	–	–
37	47.50	3.91	6	4	10
38	50.00	14.11	5	5	10
39	55.00	15.19	5	6	11

Figura 5.1

Table 1
Impact test results.

Projectile	Impact location	V_i (m/s)	V_r (m/s)	E_d (mJ)	Outcome	N_w	N_f	N_{tot}
Large sphere	Gap	50	13.2	804.7	P	5	6	11
	Yarn	50	8.5	840.3	P	6	5	11

Figura 5.2

V_i (m/s)	V_r (m/s)	P #
49.00	4.21	11
49.25	4.78	19
49.25	6.26	16
49.50	8.65	5
50.00	7.57	4
50.50	6.22	15
51.00	10.69	22
52.00	9.6	10

Figura 5.3

Se puede observar que los tres experimentos tienen velocidades residuales muy semejantes que van desde los 7.52 m/s, hasta los 14.11 m/s. También merece la pena mencionar la diferencia de la figura 5.2 ya que se dan 2 velocidades residuales diferentes. Esto es por la localización del impacto, es decir si el proyectil impacta directamente sobre la fibra (Yarn), o si en vez de eso el proyectil impacta sobre el espacio de separación entre fibras (Gap).

Las primeras simulaciones que se hicieron fueron por tanto a 50m/s como se demuestra en la siguiente figura.

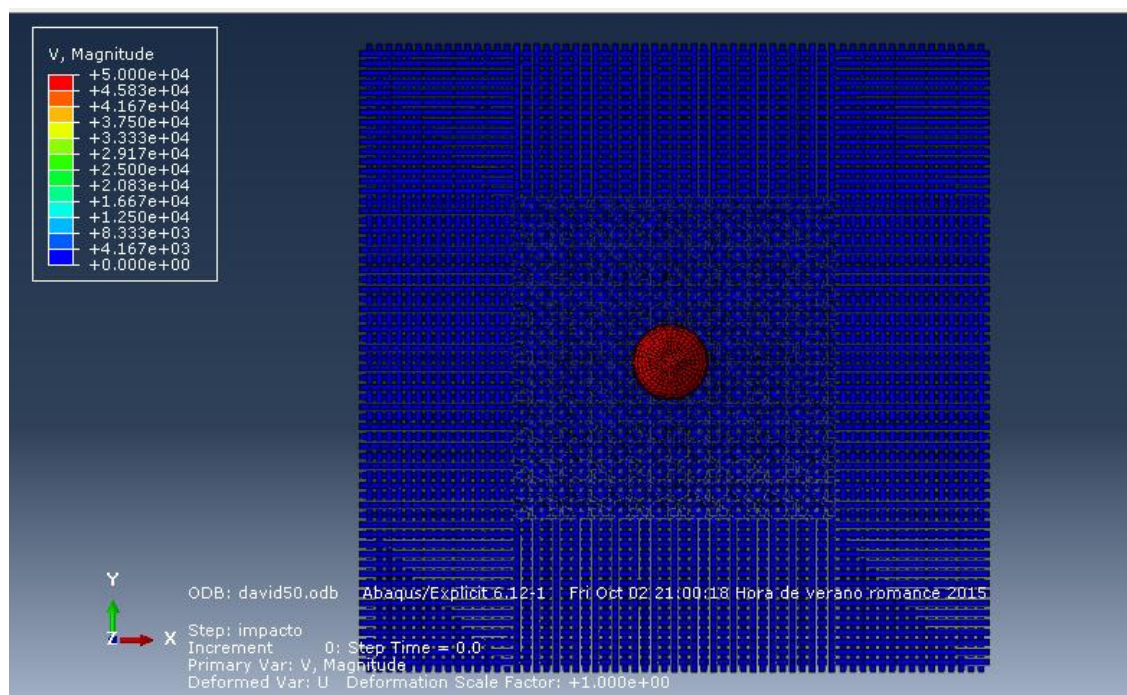


Figura 5.4

Se aprecia en la figura que el proyectil, de color rojo, posee una velocidad de 50000 mm/s, mientras que la tela está en reposo.

En las siguientes figuras se observa el final de la simulación después de 500 μ s, el proyectil ha penetrado la tela, como era de esperar. Ahora se necesita comparar la velocidad residual del proyectil para confirmar si estos datos podrían ser válidos o no.

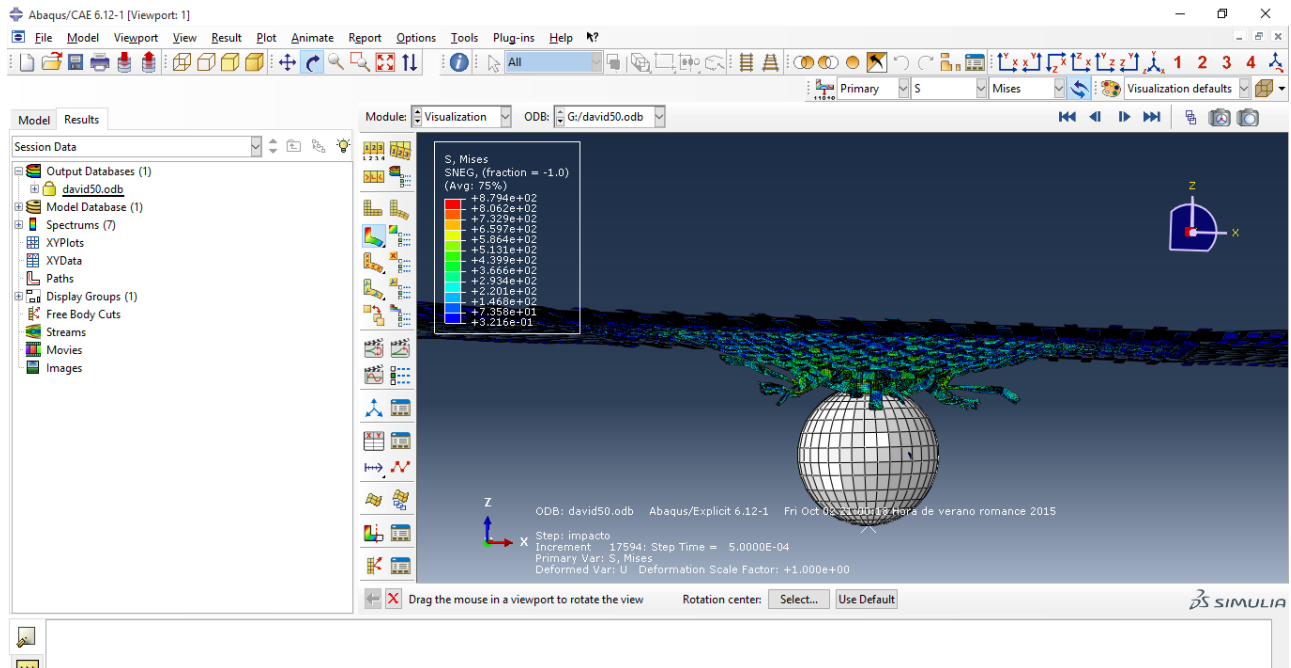


Figura 5.5

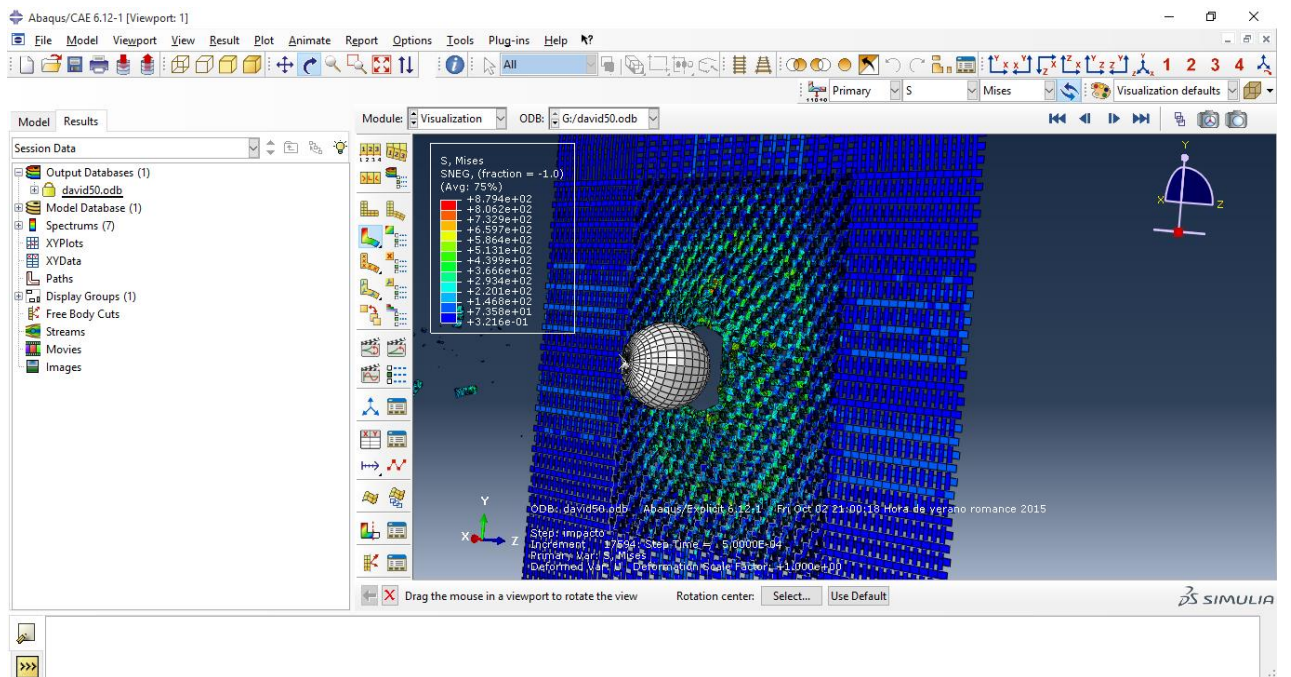


Figura 5.6

Se fueron variando los valores de las distintas propiedades de la aramida, siempre dentro de los límites que se permitía en los artículos científicos que se habían tenido en cuenta, hasta que se consiguieron los resultados acorde con los tres artículos citados anteriormente.

Los resultados se consideraron positivos cuando estuvieron entre los límites que los tres artículos citados anteriormente en este epígrafe habían colocado entre 14 m/s y 7 m/s. En la simulación realizada la velocidad residual fue 13.37 m/s como se demuestra en la siguiente figura.

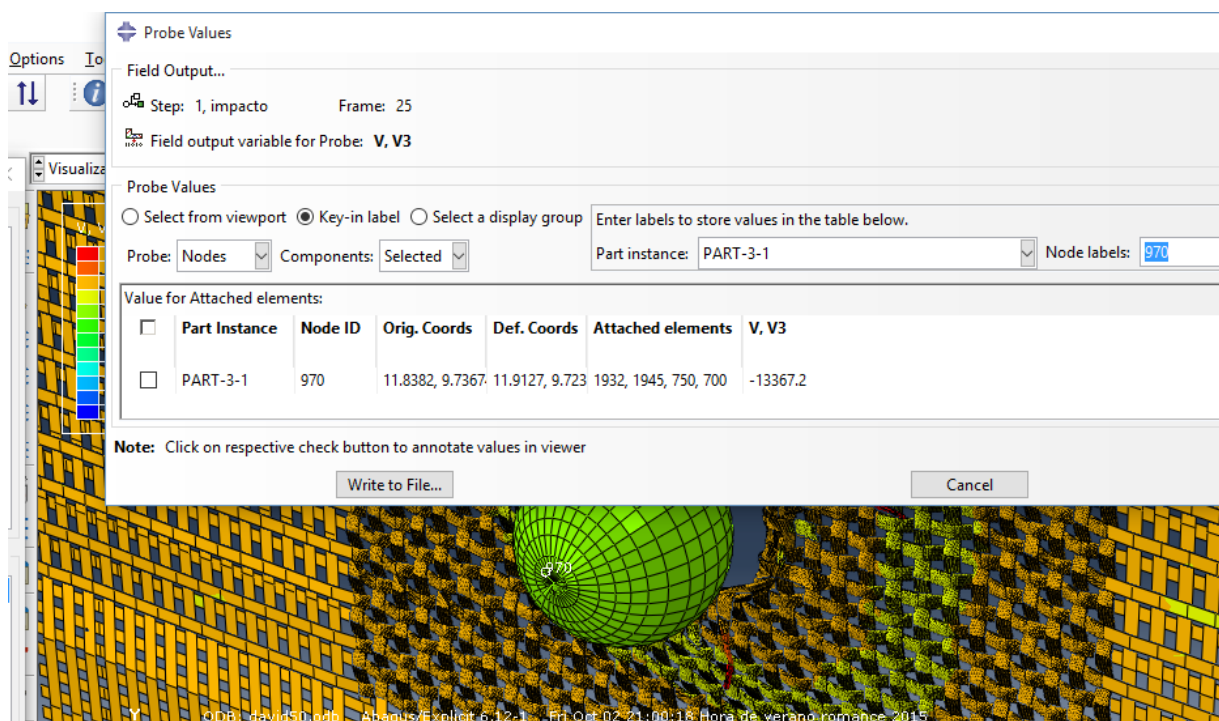


Figura 5.7

Una vez conseguida esta velocidad residual considerada un valor aceptable para el ensayo a realizar, se pasó a la segunda comprobación que fue la comprobación de las energías, para demostrar que la energía cinética que perdía el proyectil fue absorbida por la tela y disipada por el rozamiento impuesto.

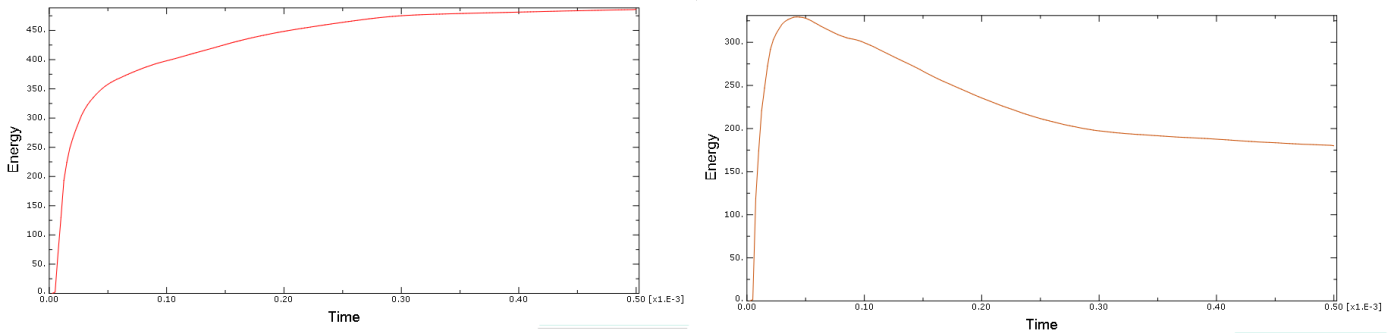
El proyectil impacta a una velocidad de 50 m/s y perfora las fibras saliendo con una velocidad de 13.3 m/s. Se necesita calcular la variación de energía que sufre el proyectil que es:

$$E_i = \frac{1}{2} \times 0.000692 \text{ Kg} \times (50)^2 = 0.865 \text{ J} ; 865 \text{ mJ}.$$

$$E_s = \frac{1}{2} \times 0.000692 \text{ Kg} \times (13.3)^2 = 0.061 \text{ J} ; 61 \text{ mJ}.$$

$$E_i - E_s = 804 \text{ mJ}.$$

A continuación se procede a obtener los valores en las gráficas que nos proporciona Abaqus de energía interna y cinética de la tela.



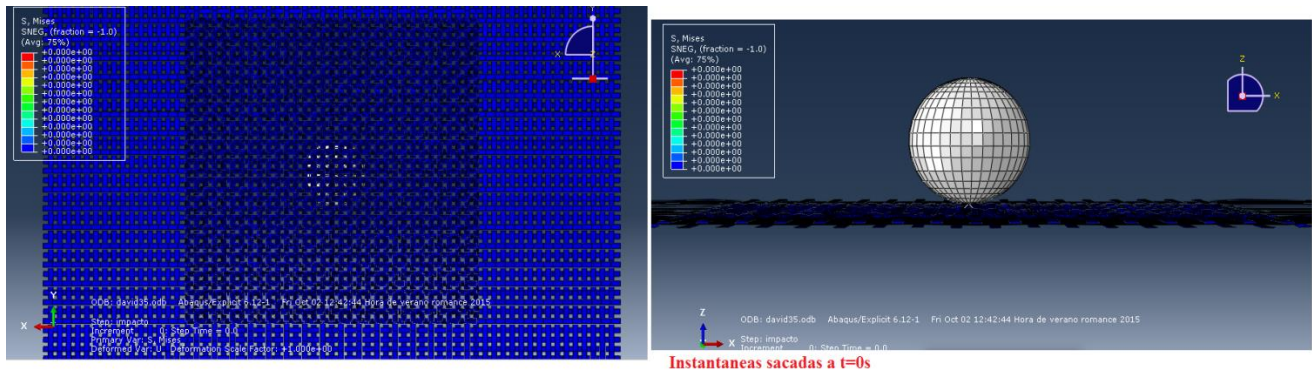
Gráficas 50 m/s

Como se puede observar en las gráficas anteriores, la energía interna (gráfica de la izquierda) asciende hasta los 490 mJ mientras que la energía cinética (gráfica de la derecha) posee un pico pero luego desciende hasta los 180 mJ.

La suma de estas dos energías de la tela da un total de 670 mJ. Los cuales difieren de los 804 mJ calculados teóricamente. Esta variación del 20% se le ha atribuido al rozamiento que se produce entre las fibras y el proyectil disipando así energía que no se llega a acumular en la tela.

Validadas las comprobaciones se dispusieron en cascada diferentes casos con diferentes velocidades para lograr una curva en función de las velocidades de impacto y las velocidades residuales y por supuesto para descubrir la velocidad límite de la tela que se ha diseñado que según los artículos leídos debería estar entre 45 y 50 m/s. En las posteriores imágenes se puede observar los diferentes casos estudiados.

- 35 m/s



Instantáneas sacadas a t=0s

Figura 5.8

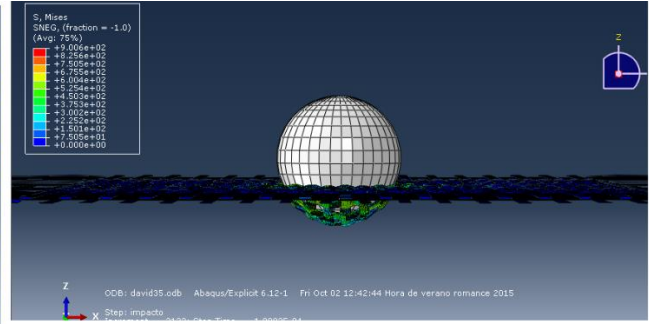
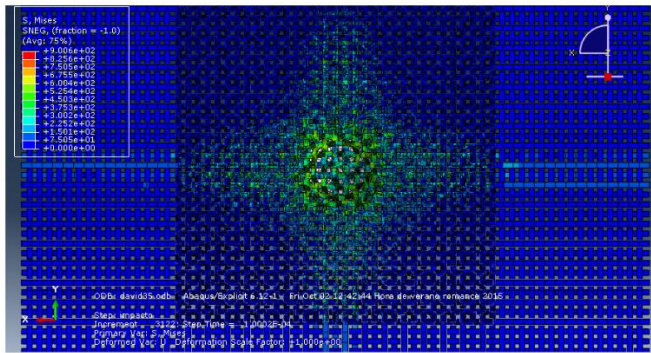


Figura 5.9

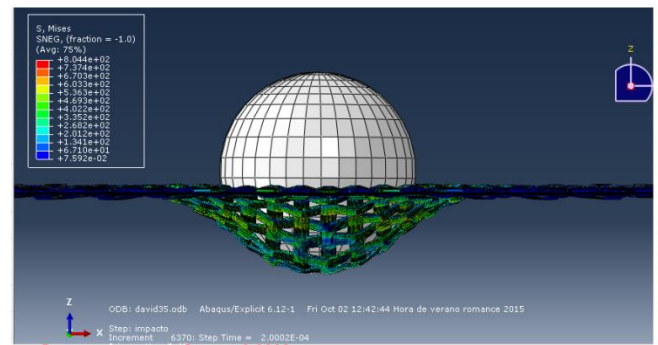
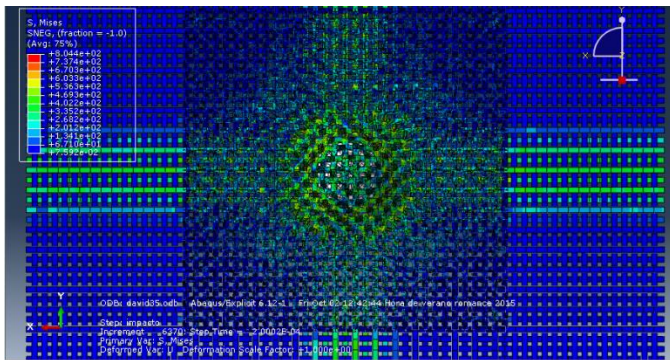


Figura 5.10

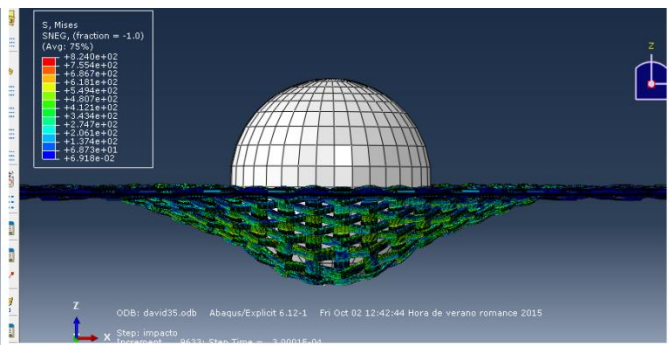
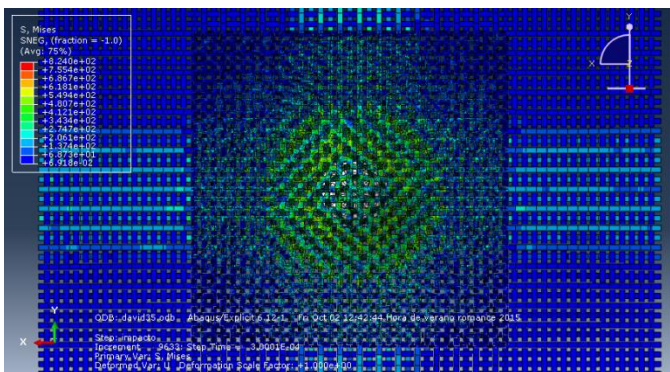


Figura 5.11

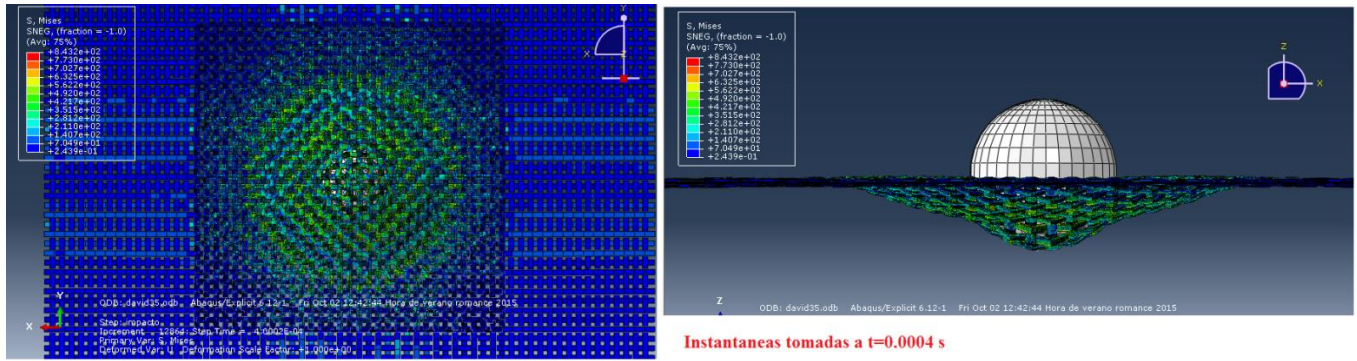


Figura 5.12

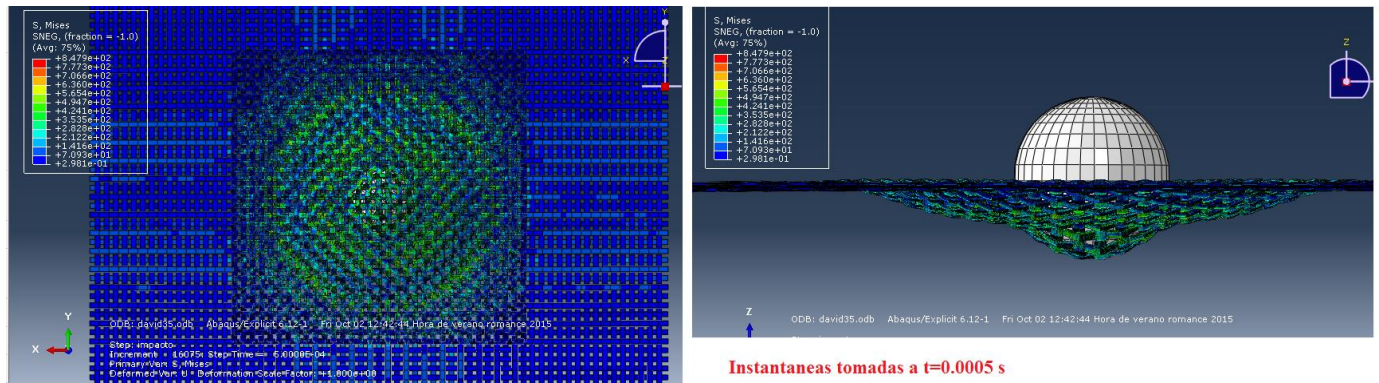
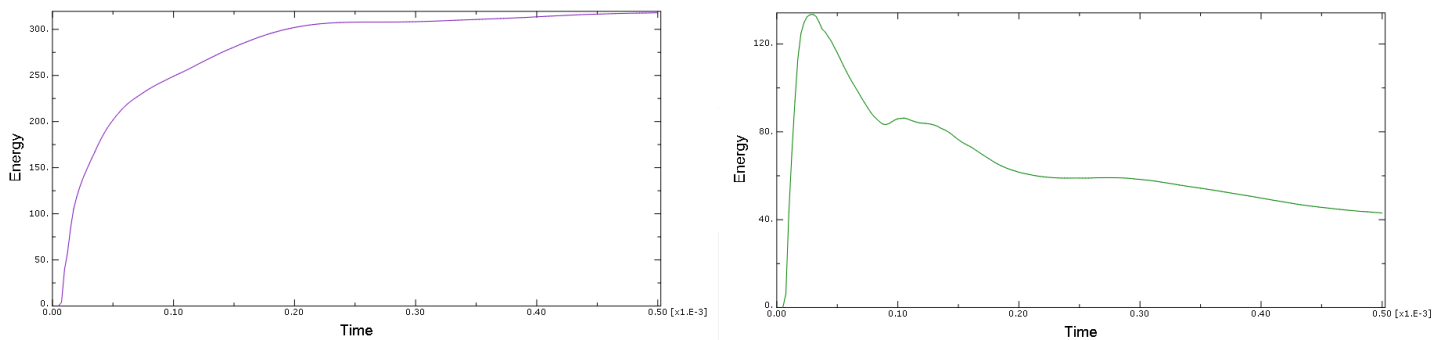


Figura 5.13

Como se puede observar en la serie de instantáneas anteriores tomadas de Abaqus, el proyectil a 35 m/s de velocidad de impacto ni rompe ninguna fibra ni traspasa la tela. En consecuencia se concluye que el modelo presentado para la simulación responde positivamente y según lo esperado. Se considera este tiempo de 500 μ s el tiempo final ya que el proyectil ya está rebotando en la tela ya que su velocidad ha cambiado de signo.



Gráficas 35 m/s

Para la velocidad de impacto de 35 m/s, el proyectil no perfora, y por tanto no habría que hacer la diferencia de energías, bastaría con calcular su energía antes del impacto, que es 423 mJ. Según las gráficas obtenidas de Abaqus que se encuentran previamente a este texto, la energía interna (izquierda) será 318 mJ, mientras que la energía cinética de las fibras serán 45 mJ. La suma de ambas da 363 mJ. La pérdida de energía como ya se ha dicho anteriormente se atribuye al rozamiento y es aproximadamente un 17%.

- 42 m/s.

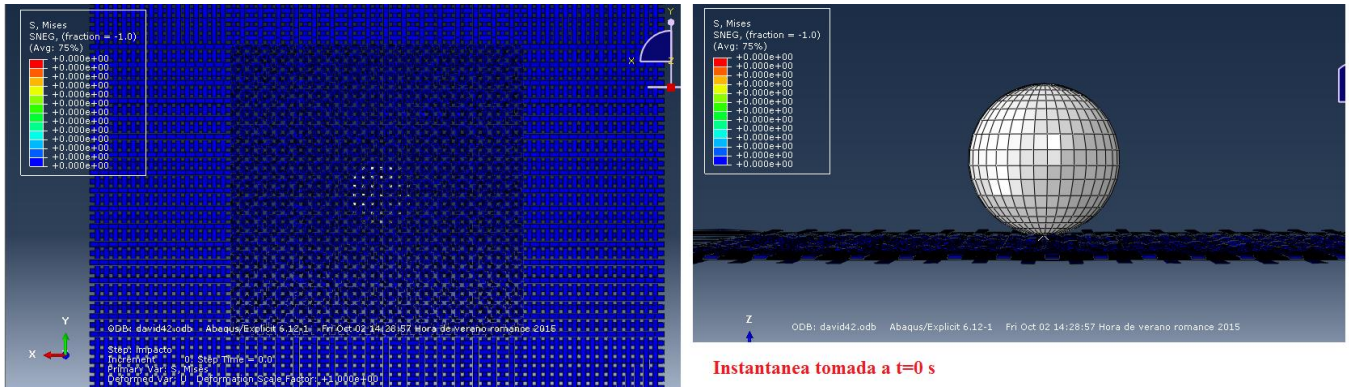


Figura 5.14

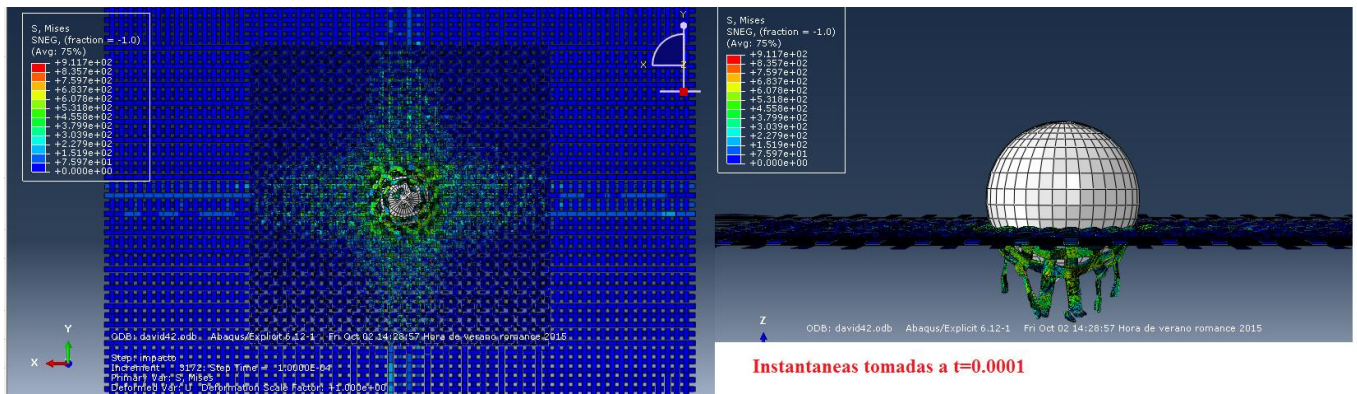


Figura 5.15

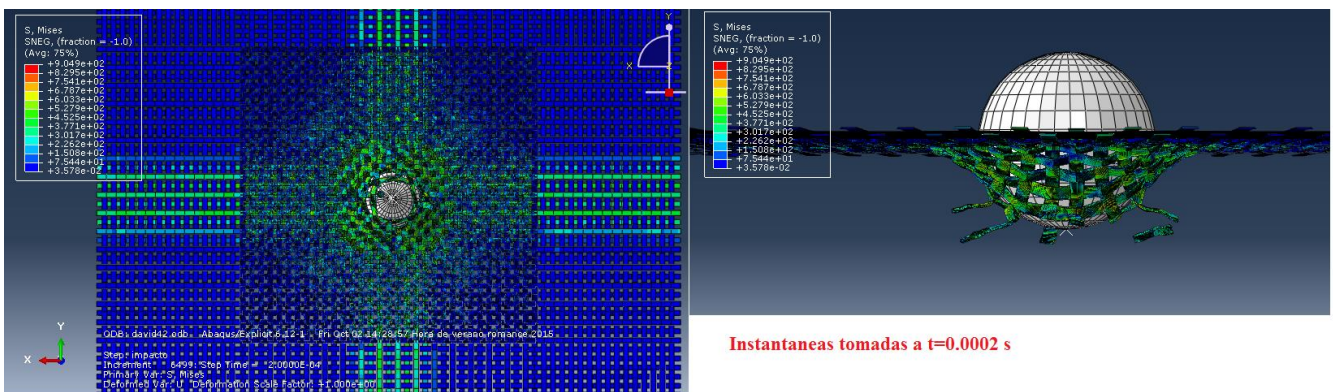


Figura 5.16

Como se va observando en estas imágenes, a la velocidad de 42 m/s, algunas fibras van rompiendo pero no debería de penetrar la tela, es decir, que la tela debería atrapar el proyectil para que se considerase bien diseñada.

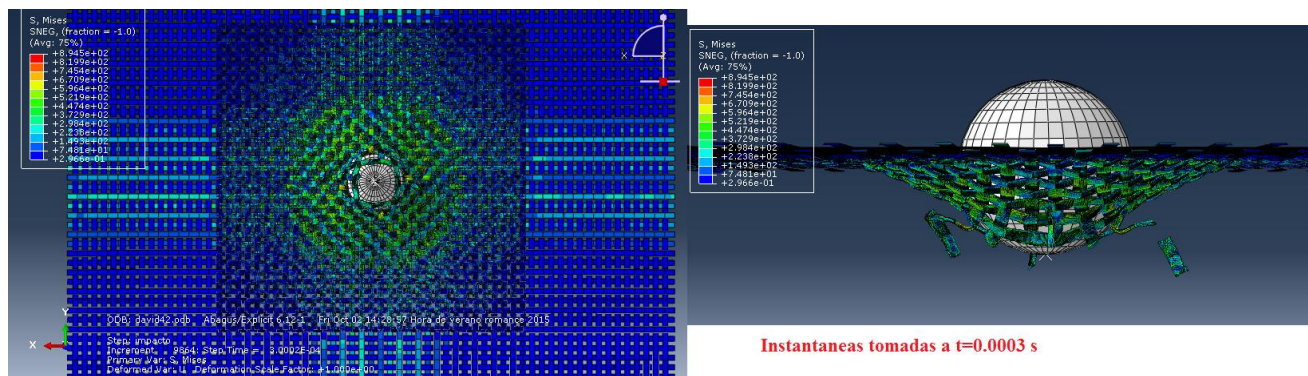


Figura 5.17

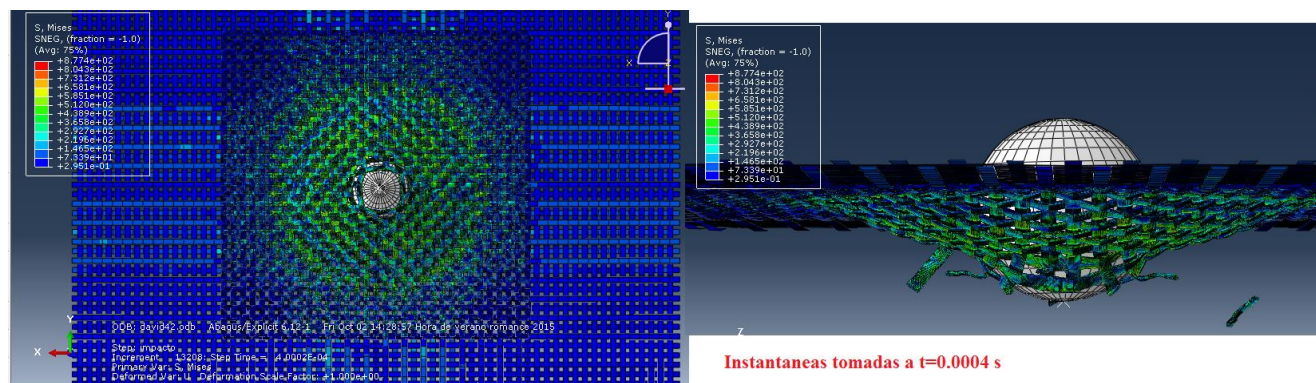


Figura 5.18

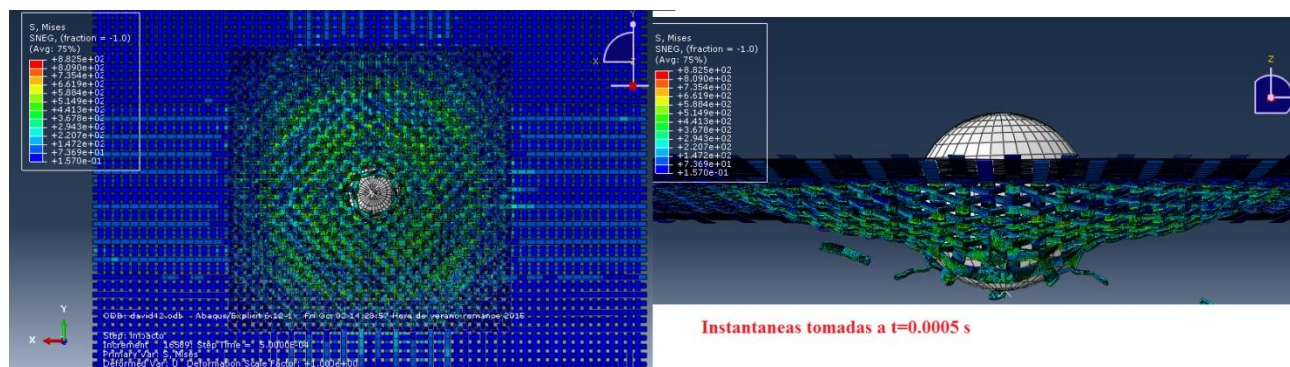
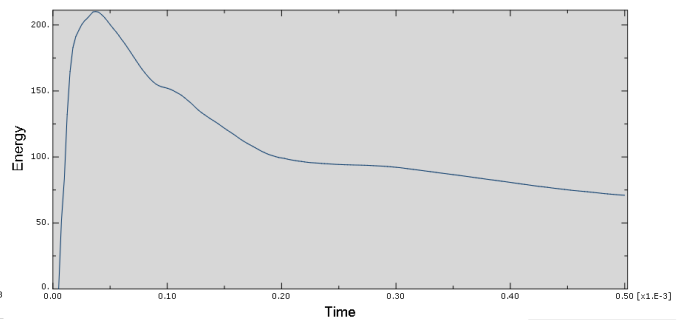
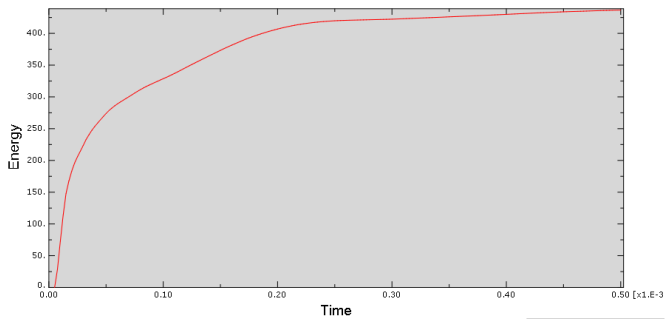


Figura 5.19

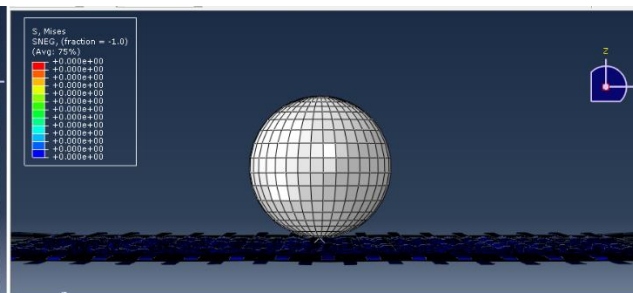
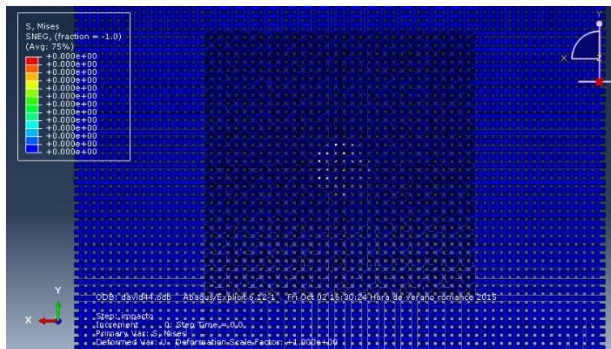
Aunque las fibras sufran esa rotura que se menciona anteriormente, el proyectil no consigue la total perforación de la tela ya que su velocidad cambia de sentido y toma el

valor de -0.4 m/s, es decir que ya está rebotando en $t=500$ μ s. En cuanto a las energías, tampoco perfora a esta velocidad de impacto, y la energía que posee el proyectil antes del impacto con 42 m/s de velocidad es 610 mJ. Mientras que de las gráficas posteriores se obtiene: energía interna (izquierda) 440 mJ, energía cinética de las fibras (derecha) 70 mJ, lo que da un total de 510 mJ. Como se ha explicado anteriormente esa diferencia se debe al rozamiento y es aproximadamente un 20%.



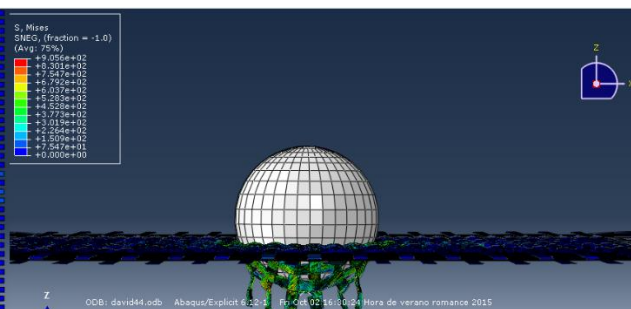
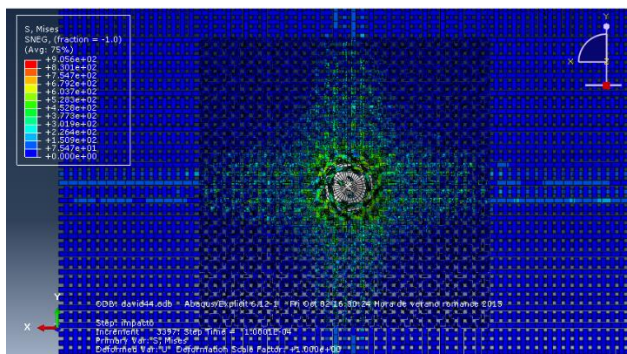
Gráficas 42 m/s

- 44 m/s



Instantáneas tomadas a $t=0$ s

Figura 5.20



Instantáneas tomadas a $t=0.0001$ s

Figura 5.21

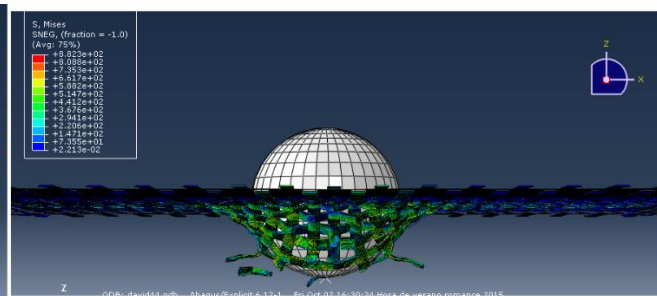
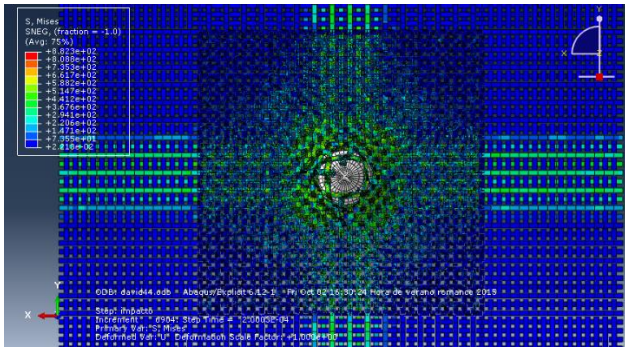


Figura 5.22

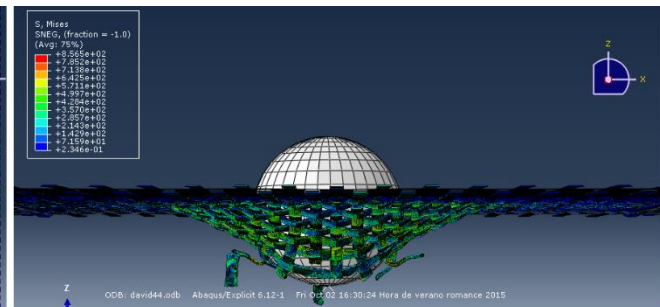
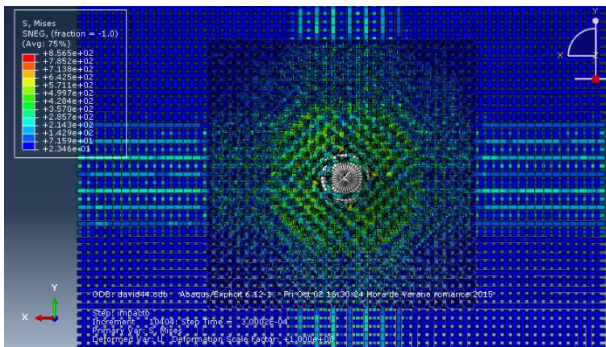


Figura 5.23

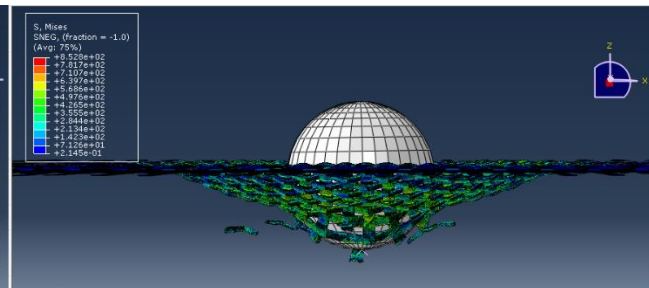
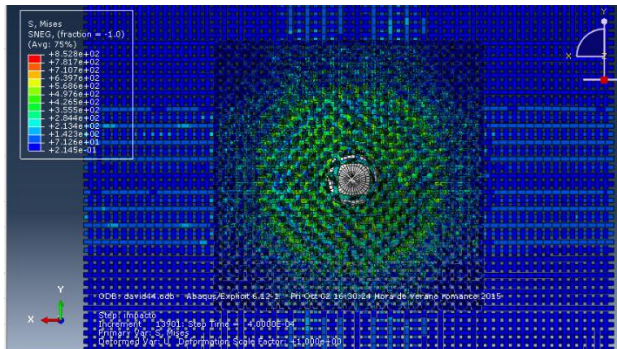


Figura 5.24

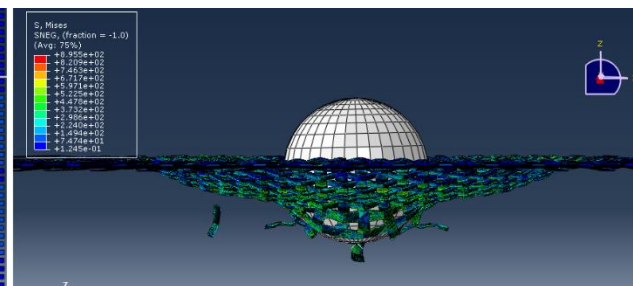
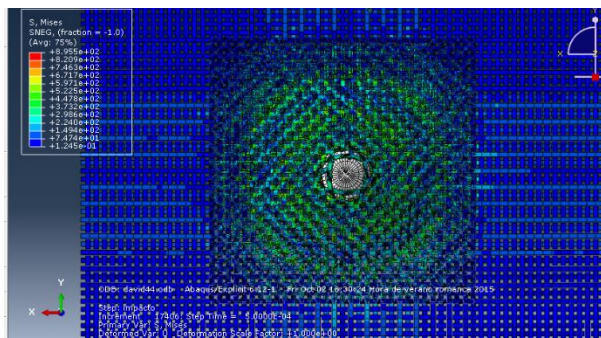
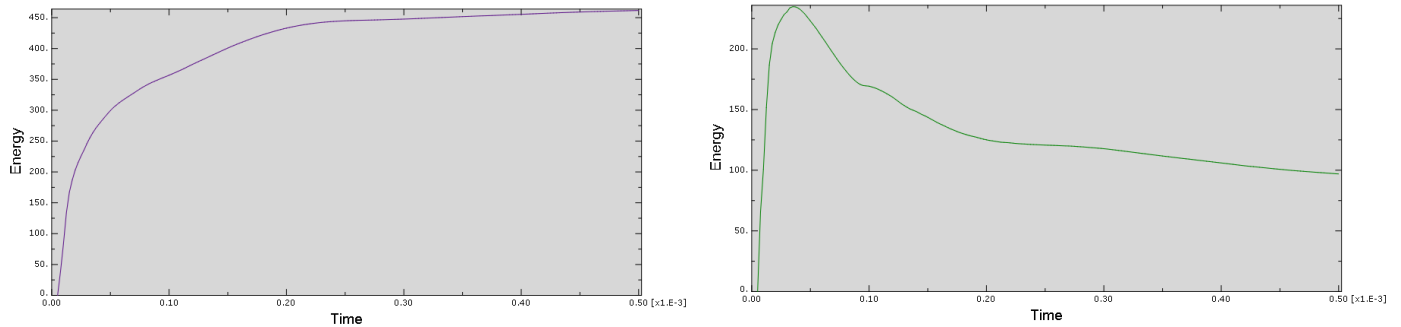


Figura 5.25

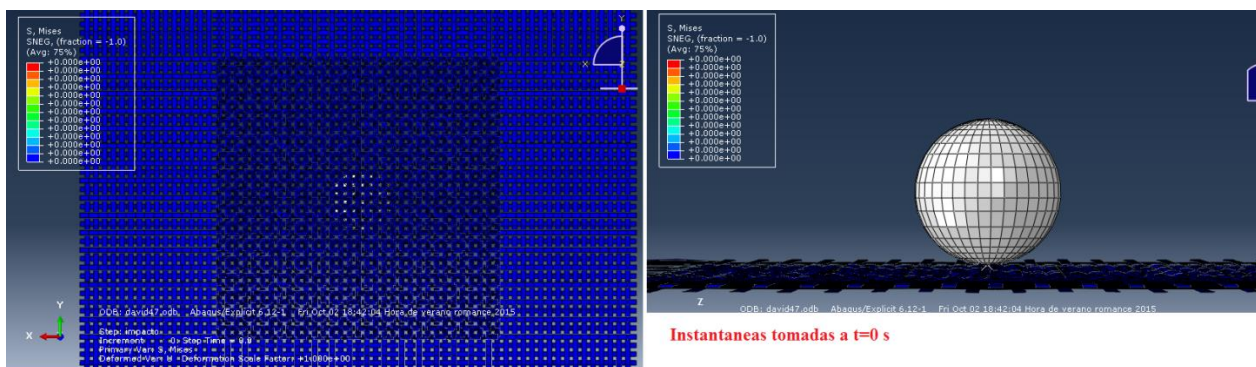
Para la velocidad de impacto de 44 m/s se puede apreciar como en el anterior caso, que sí que consigue romper las fibras pero no consigue la penetración ya que en el tiempo de 500 μ s su velocidad también es negativa y de valor -0.1 m/s. En este caso la energía que poseía el proyectil antes del impacto era 669 mJ. Y sumando energía interna (izquierda), 470 mJ más energía cinética de las fibras (derecha) 100 mJ da 570 mJ de energía que ha absorbido la tela, la diferencia en este caso por culpa del rozamiento es del 17%.



Gráficas 44 m/s

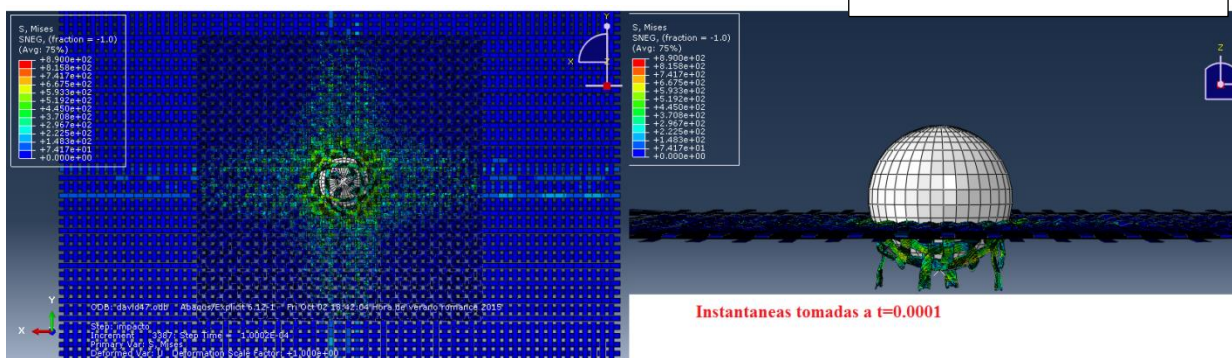
Todo esto lleva a pensar que el modelo diseñado tiene unas buenas propiedades, ya que en uno de los artículos mencionados anteriormente de [Gaurav Nilakantan \[12\]](#) se menciona que para un tipo de fibra de aramida la velocidad de impacto con la que un 99% de los casos deberían penetrar es 47,73 m/s. Por tanto el siguiente caso a estudiar será con una velocidad de impacto similar.

- 47 m/s.



Instantáneas tomadas a $t=0$ s

Figura 5.26



Instantáneas tomadas a $t=0.0001$

Figura 5.27

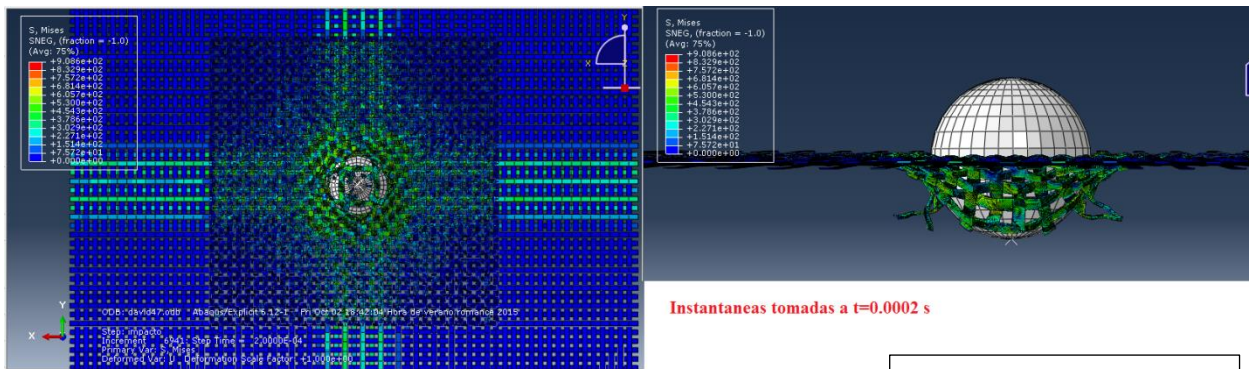


Figura 5.28

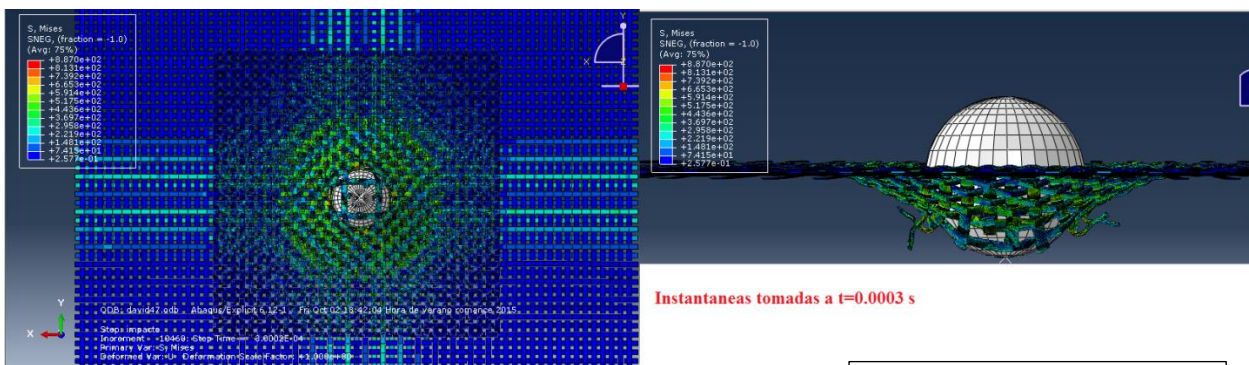


Figura 5.29

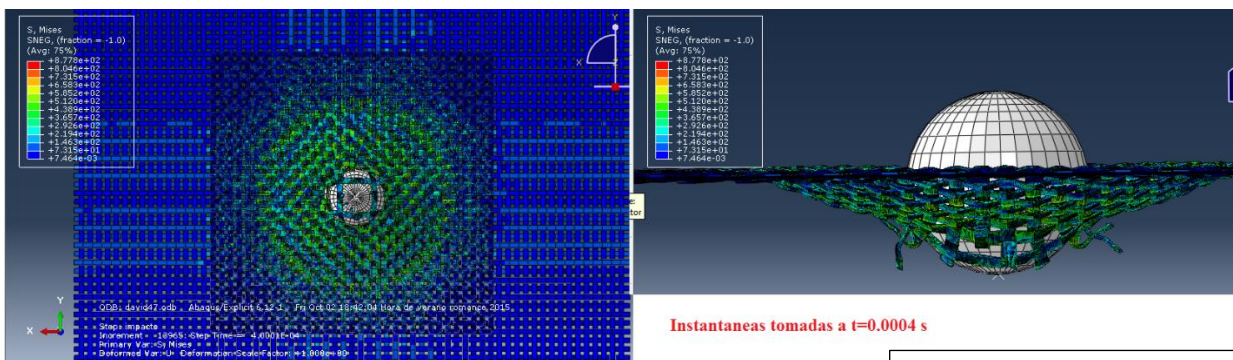


Figura 5.30

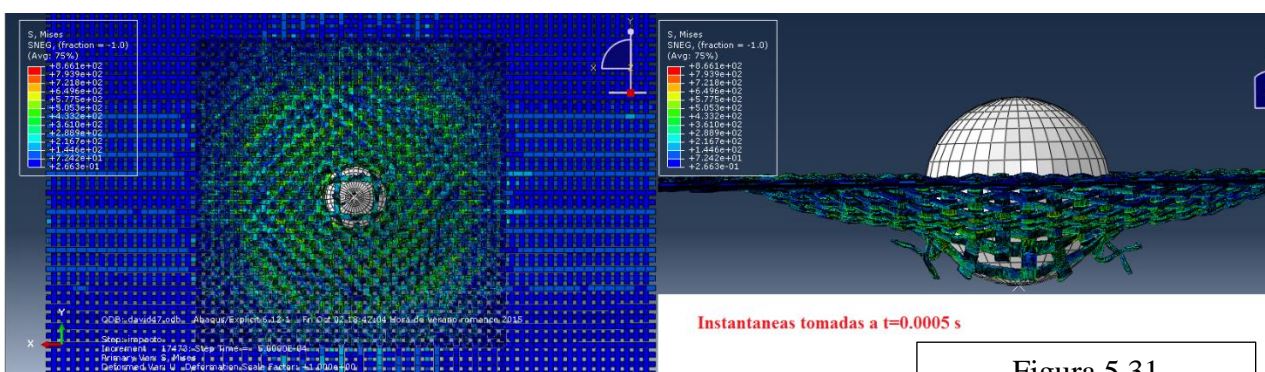
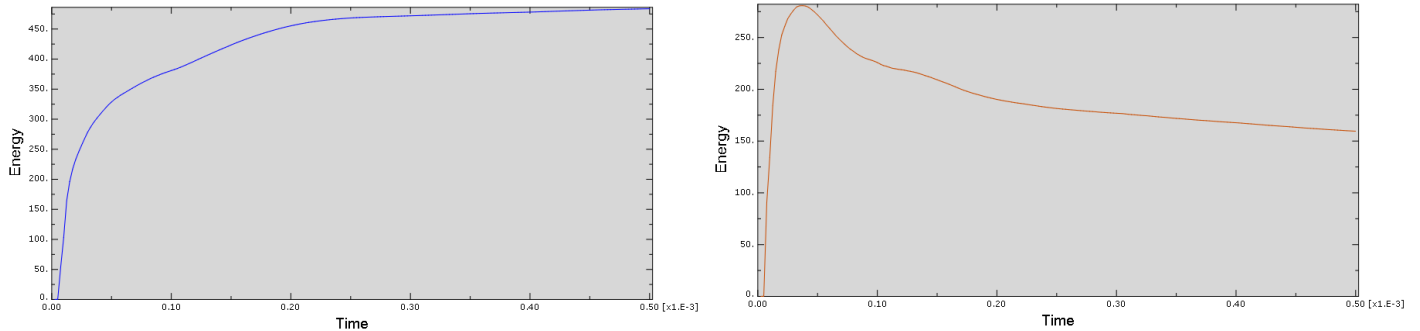


Figura 5.31

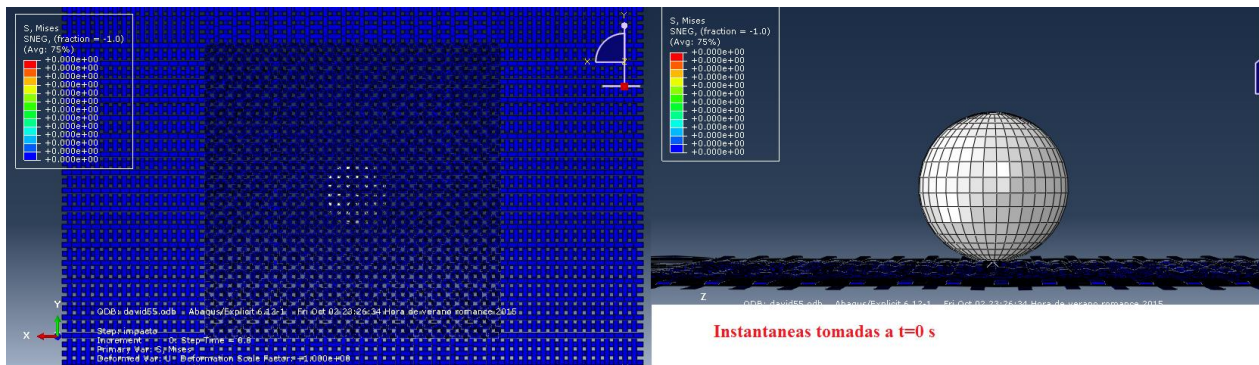
Para este caso se observa que la bala queda atrapada también en la tela como los anteriores, sobre todo por esas 4 fibras que el proyectil no ha conseguido romper en el impacto y por tanto consiguen frenar totalmente al proyectil, de hecho su velocidad también cambia de signo y toma el valor de -0.09m/s en $t=500\text{ }\mu\text{s}$. De momento se puede ir concluyendo que a bajas velocidades el modelo propuesto tiene una muy buena reacción, ya que de momento va cumpliendo todas las especificaciones previstas.



Gráficas 47 m/s

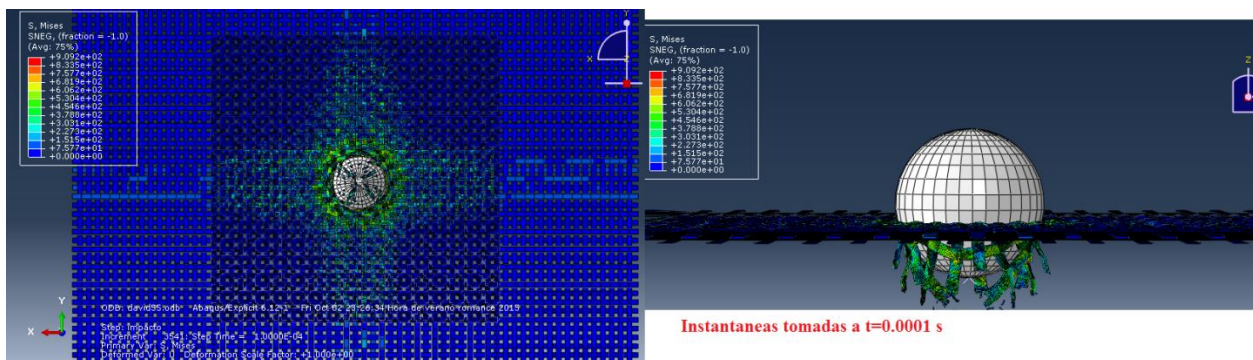
En cuanto a las energías, Teóricamente se calcula una energía de 764 mJ mientras que las gráficas dan 645 mJ de energía absorbida por la tela. Energía interna (izquierda) 480 mJ y energía cinética (derecha) 165 mJ

- 55 m/s.



Instantaneas tomadas a $t=0\text{ s}$

Figura 5.32



Instantaneas tomadas a $t=0.0001\text{ s}$

Figura 5.33

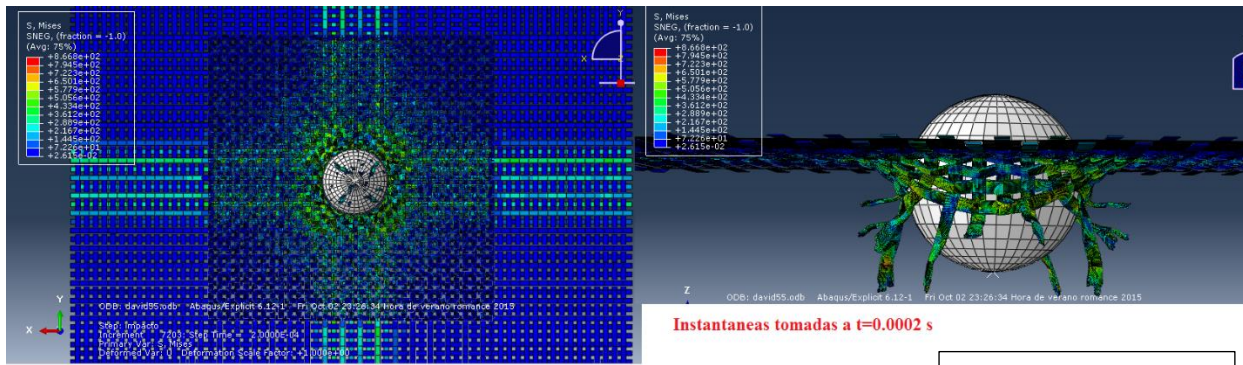


Figura 5.34

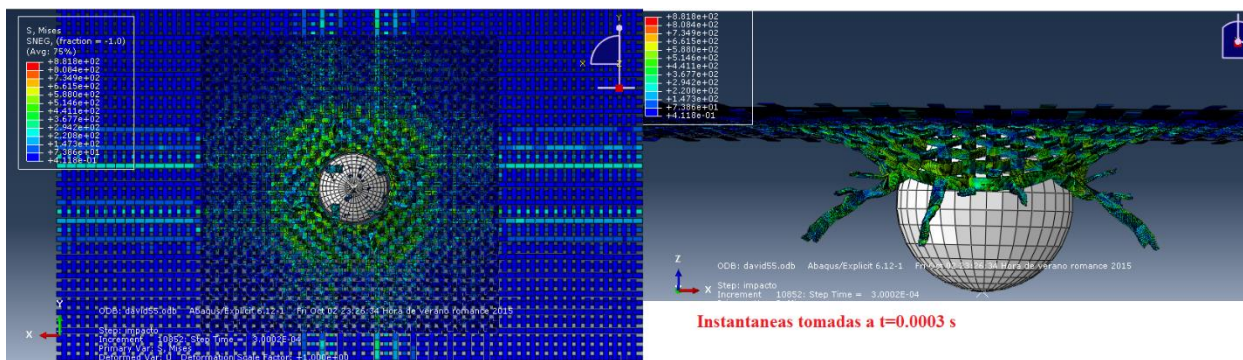


Figura 5.35

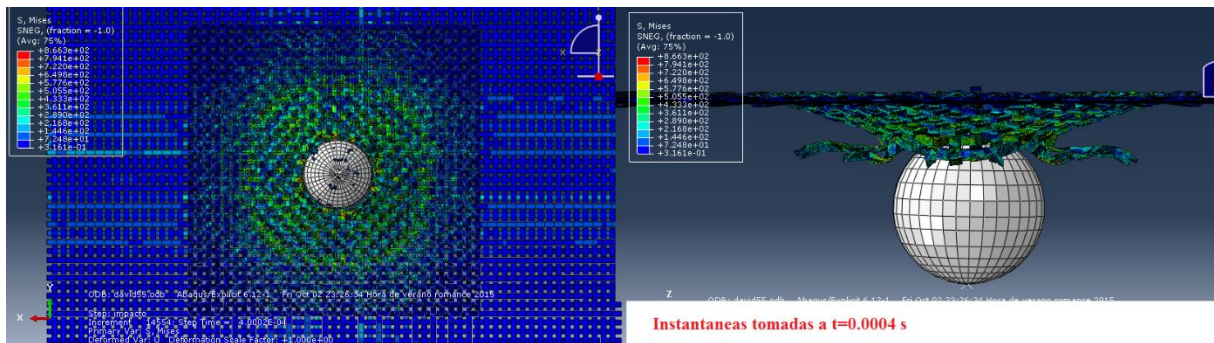


Figura 5.36

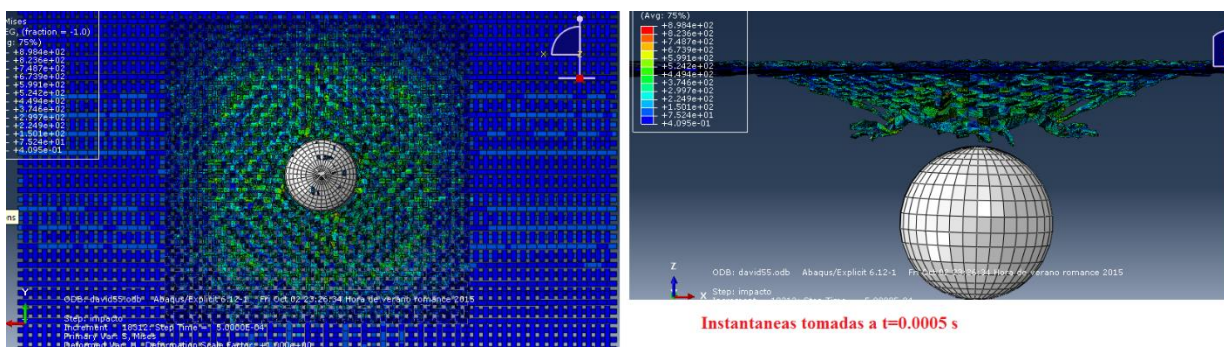
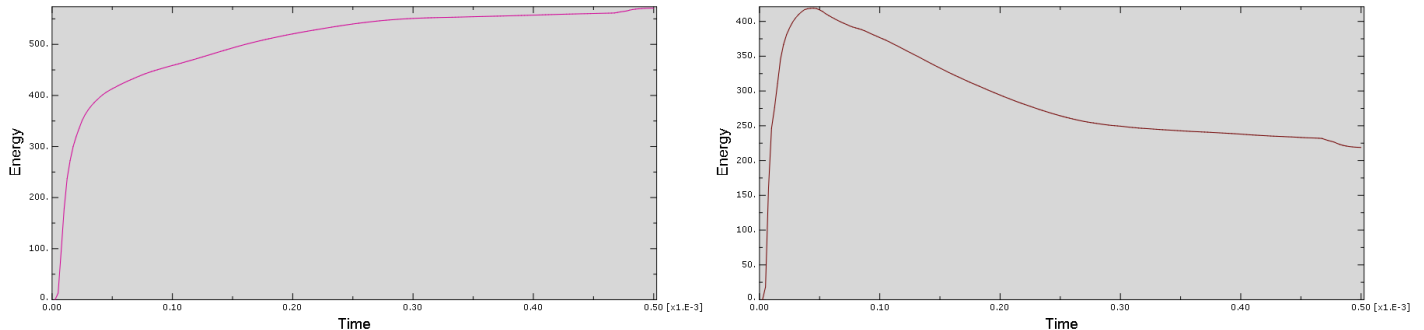


Figura 5.37

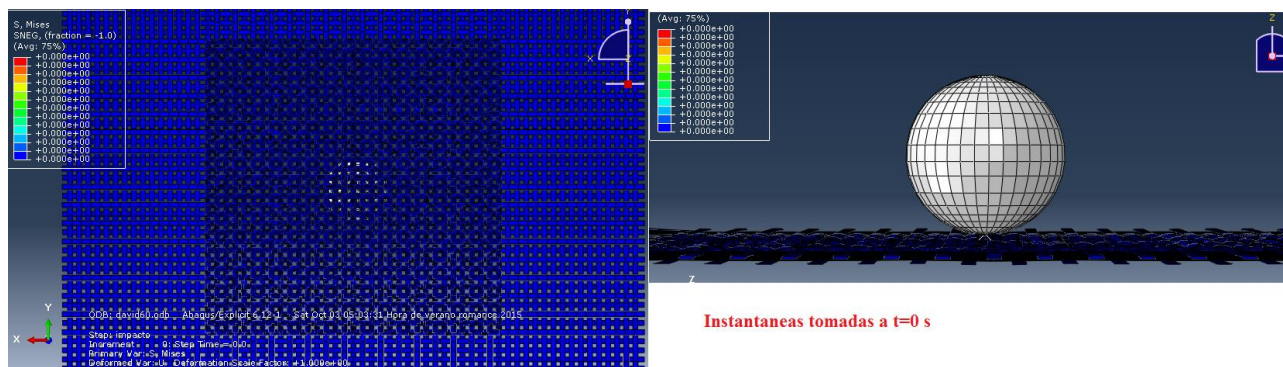
Para la velocidad de impacto de 55 m/s ya se observa en la serie de imágenes anteriores que el proyectil consigue penetrar la tela saliendo de ella con una velocidad residual de 15.98 m/s. Esto se puede comparar con los datos de la literatura [11], [12], y por tanto se demuestra que el modelo sigue respondiendo como se desea dando unos resultados muy positivos.



Gráficas 55 m/s

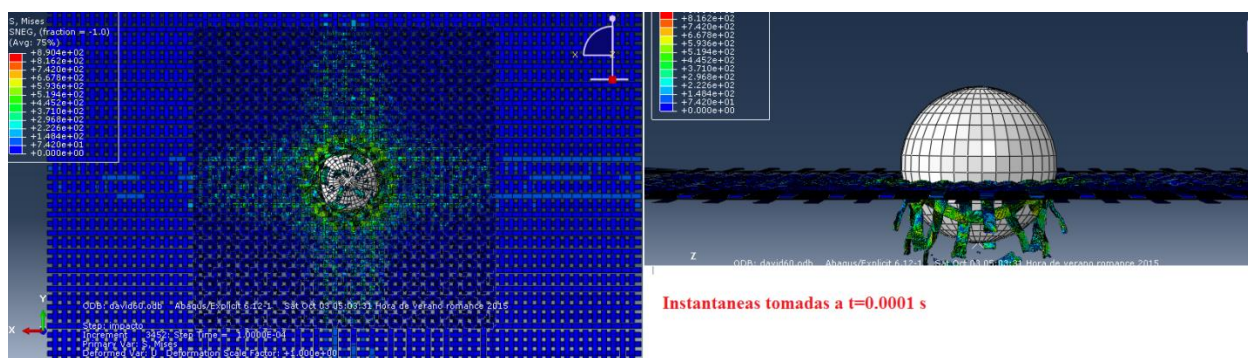
De las gráficas anteriores se deduce una energía interna (izquierda) de 570 mJ y una energía cinética (derecha) de 220 mJ. Sumando las dos cantidades obtenemos la energía absorbida por la tela que es 790 mJ. Teóricamente sabiendo que el proyectil impactaba a 55 m/s y perforaba saliendo con 15.98 m/s se deduce que la energía transferida es 958 mJ.

- 60 m/s.



Instantaneas tomadas a t=0 s

Figura 5.38



Instantaneas tomadas a t=0.0001 s

Figura 5.39

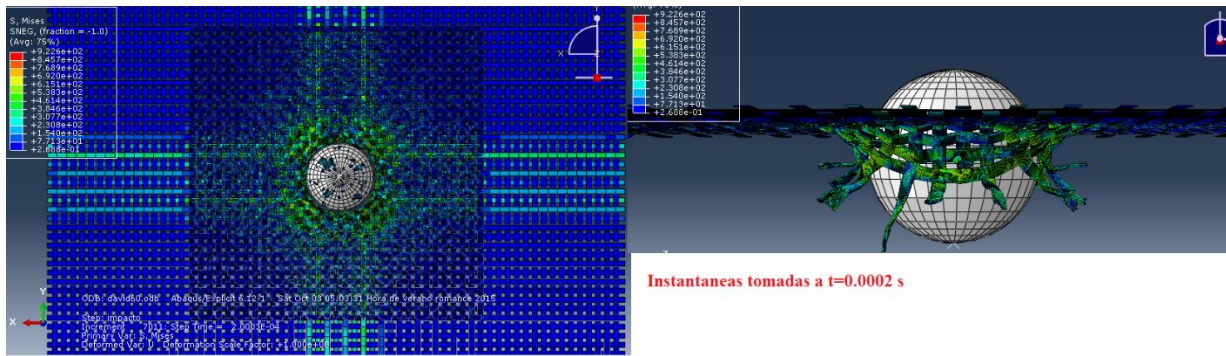


Figura 5.40

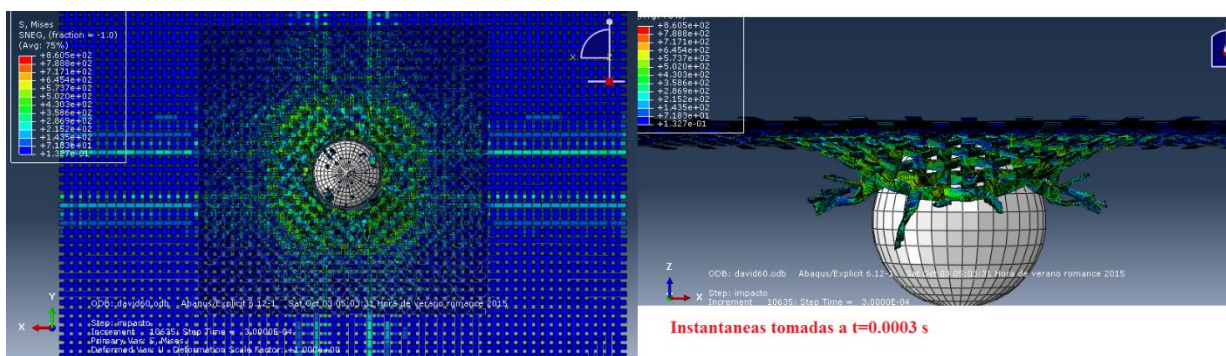


Figura 5.41

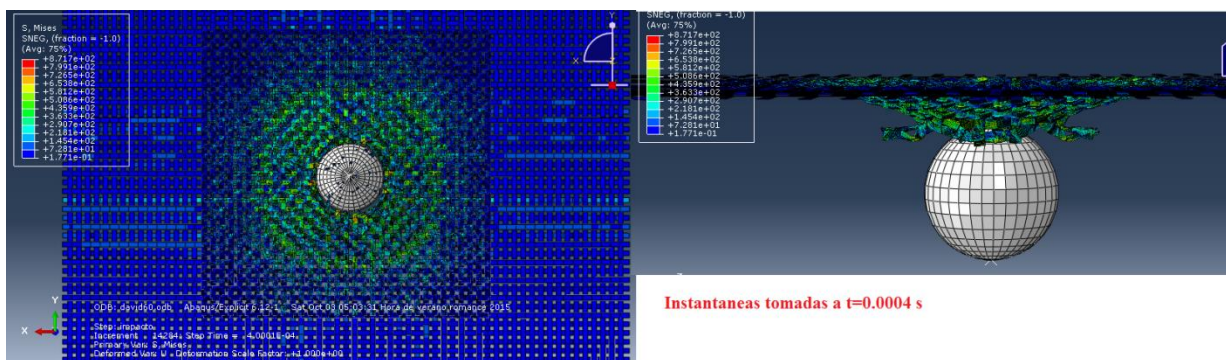


Figura 5.42

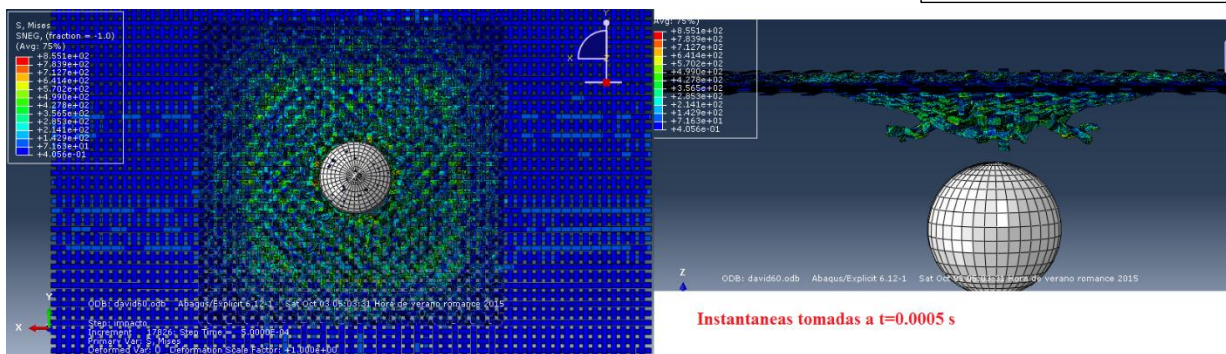
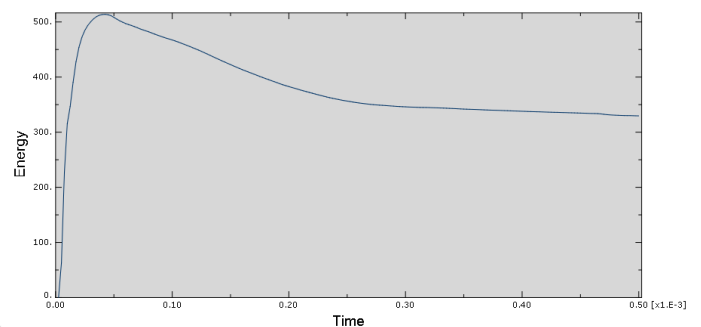
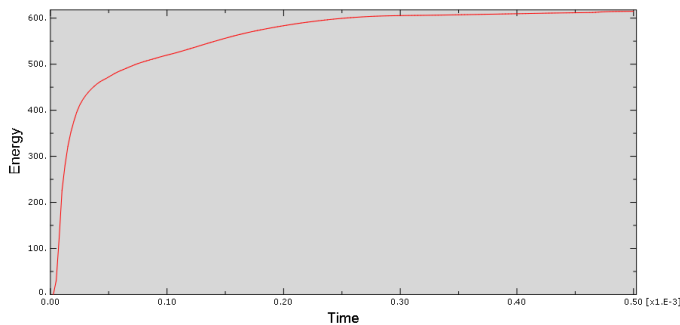


Figura 5.43

En esta simulación se observa también que la bala consigue traspasar la tela de aramida. Para este caso ya empiezan a variar los resultados obtenidos en la simulación con los leídos en la literatura [11], [12], [13]. La velocidad residual del proyectil en este caso es: 16.9 m/s.



Gráficas 60 m/s

Para las energías, se puede deducir de las gráficas anteriores una energía total de las fibras de 955 mJ. Energía interna, izquierda, 615 mJ y energía cinética, derecha, 340 mJ. Teóricamente la energía calculada que debería haberse traspasado a las fibras es de 1145 mJ.

- 70 m/s.

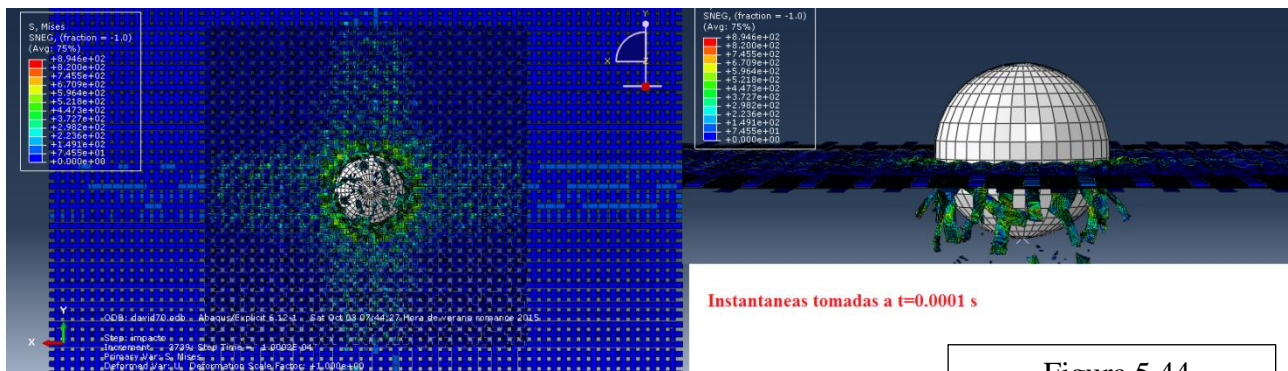


Figura 5.44

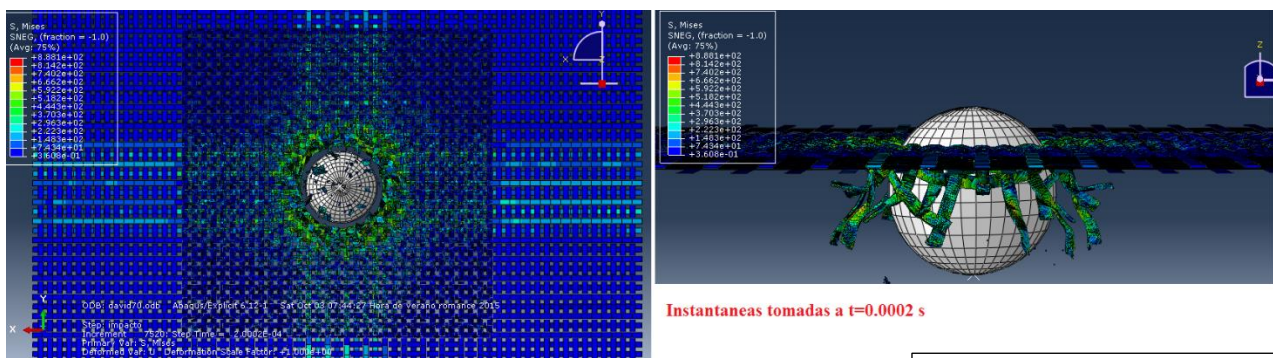


Figura 5.45

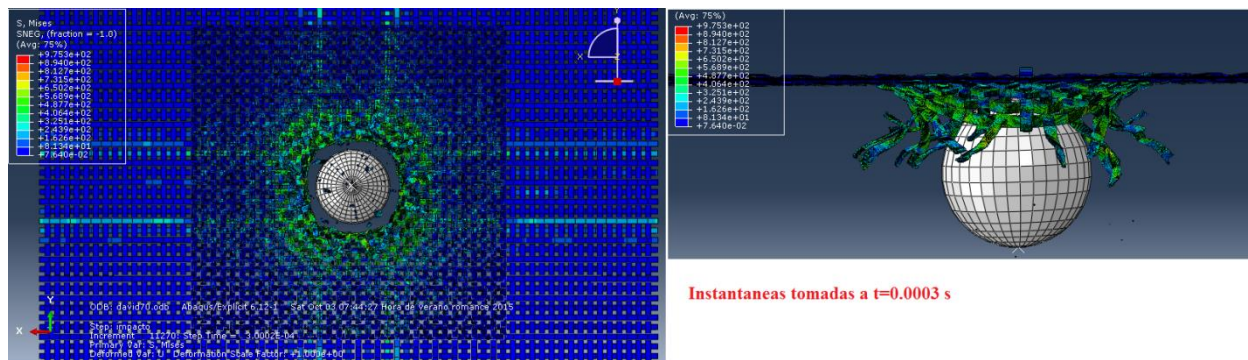
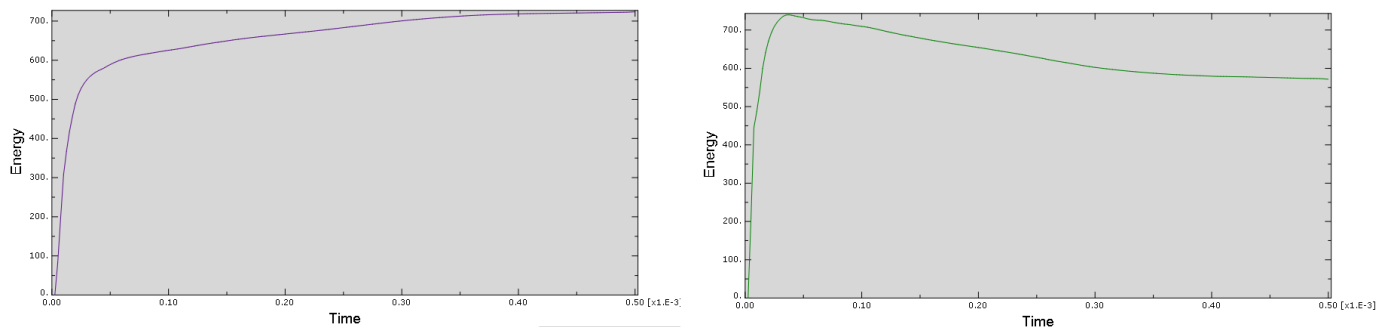


Figura 5.46

Según se va aumentando la velocidad de impacto, el tiempo que tarda la bala en perforar se reduce y se puede apreciar que el daño de la tela se focaliza cada vez más en la zona de impacto del proyectil, dato que es muy positivo para la simulación ya que se leyó en artículos que era lo que debería pasar [11], [12].

Para este caso la velocidad residual del proyectil es 18.9 m/s.



Gráficas 70 m/s

Con la velocidad de impacto de 70 m/s, se deduce teóricamente una energía perdida por el proyectil y por tanto que debería ser traspasada a las fibras de 1570 mJ. Según las gráficas que aparecen anteriormente se aprecia una energía de 1305 mJ, que es la suma de la energía interna, izquierda, 725 mJ y de la energía cinética que posee la tela, derecha, 580 mJ.

- 85 m/s.

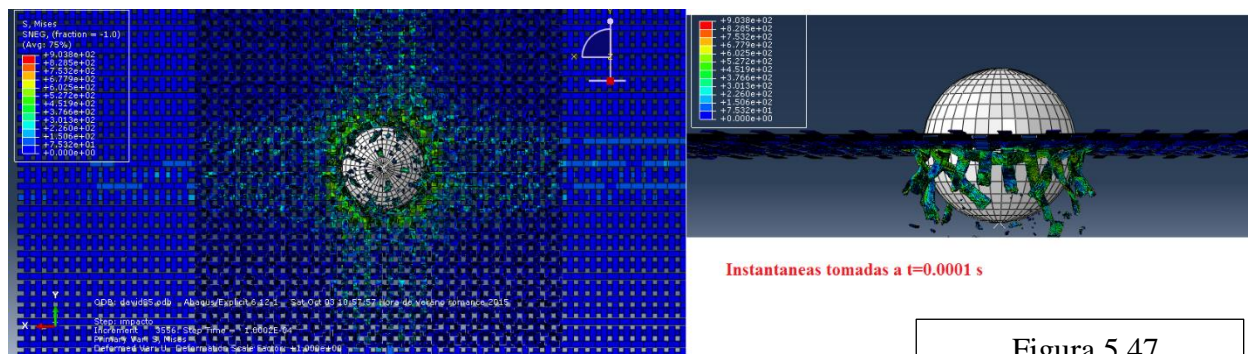


Figura 5.47

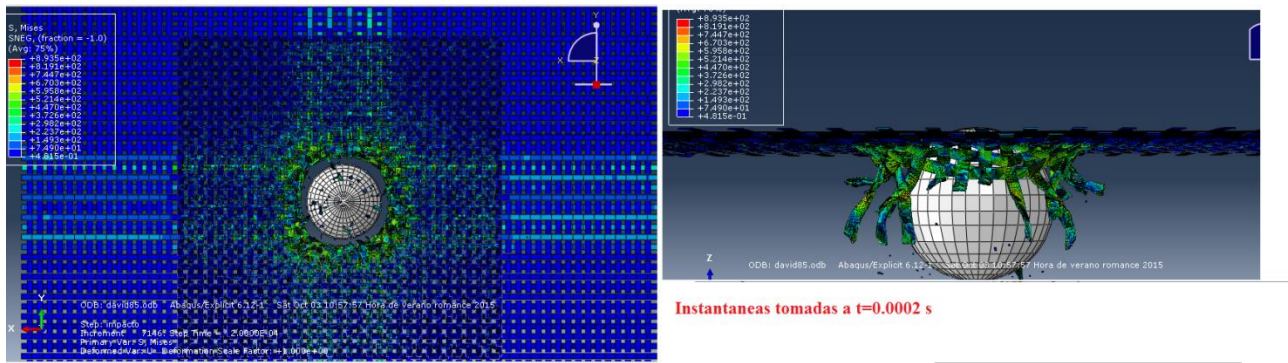


Figura 5.48

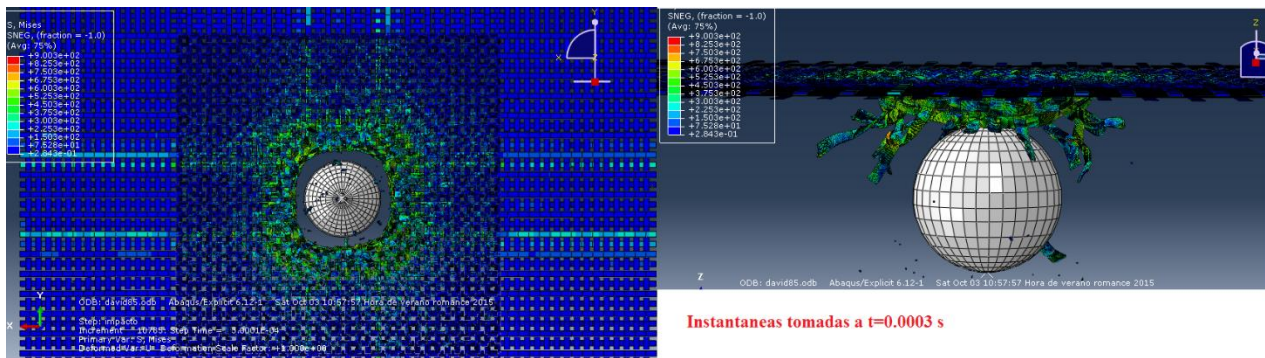
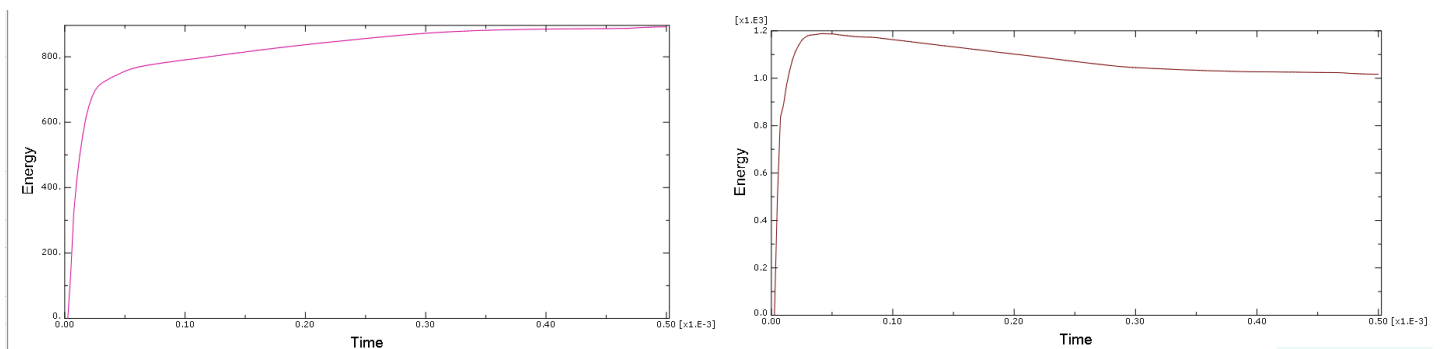


Figura 5.49

Según se ha dicho anteriormente, el daño se focaliza cada vez más, la rotura de las fibras se va produciendo cada vez antes y se va abriendo el hueco perforado por el proyectil, y como consecuencia el rozamiento influye mucho menos. Para esta velocidad de impacto de 85 m/s la velocidad residual de salida del proyectil es 22.2 m/s.

Para las energías se deduce teóricamente 2330 mJ y de las siguientes gráficas de energía interna (izquierda), 895 mJ, y energía cinética (derecha), 1010 mJ, daba un total de 1905 mJ. Se sigue manteniendo esa disipación de energía por el rozamiento en un 20%.



Gráficas 85 m/s

- 100 m/s.

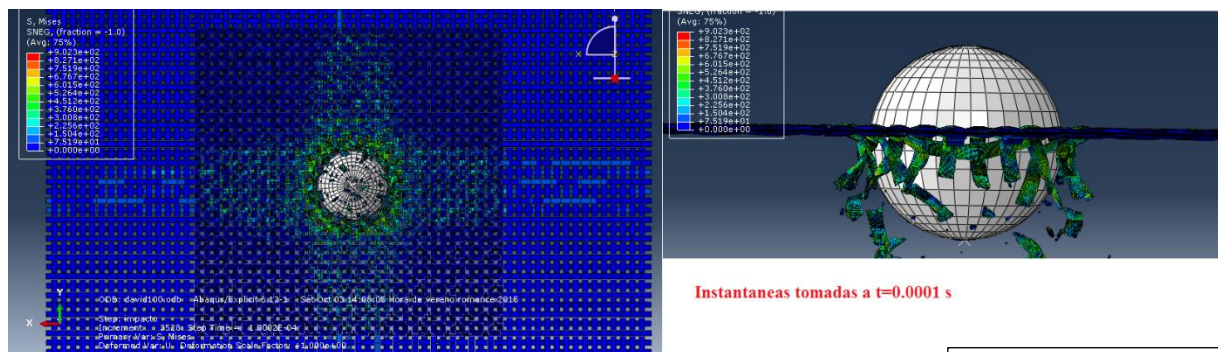


Figura 5.50

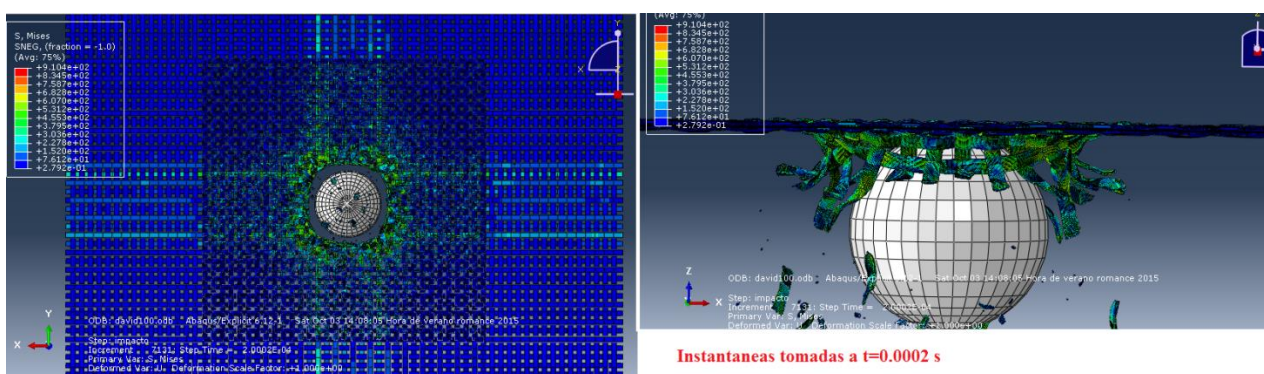
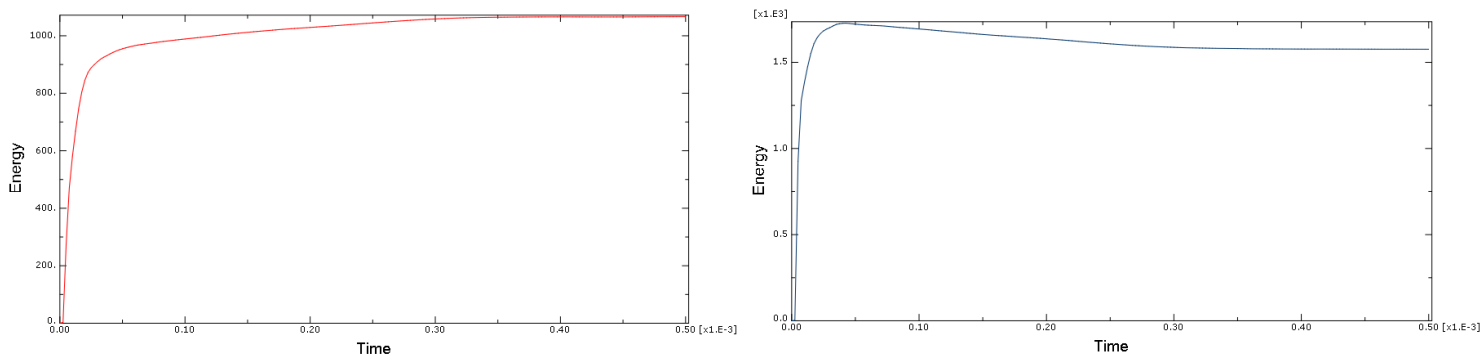


Figura 5.51

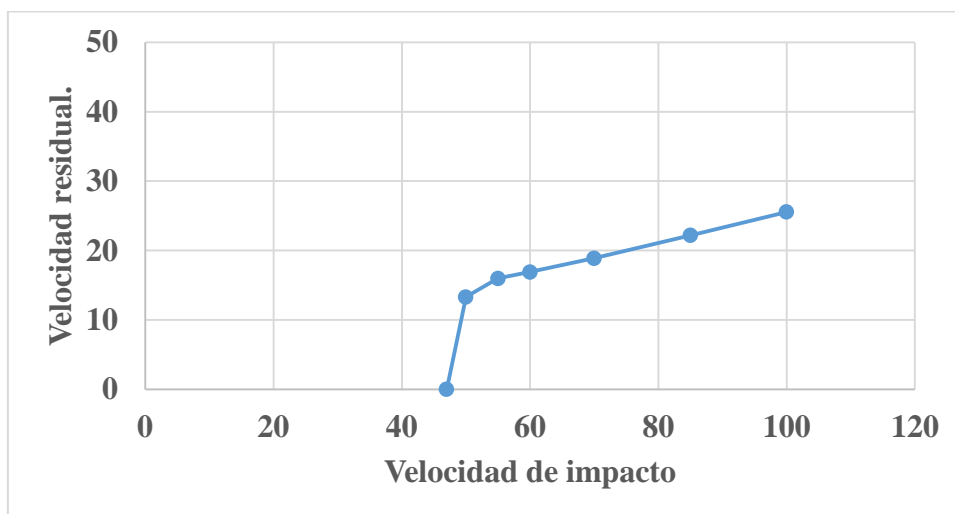
Para este caso la velocidad residual del proyectil, que ya ha penetrado la tela a los 200 μ s, es de 25.55 m/s. La focalización del daño es mucho más grande que en los casos anteriores y por supuesto la abertura que se produce en la tela también es más grande que en los anteriores.

Para esta variación de velocidades se dedujo una energía de 3260 mJ, mientras que en las gráficas que posteriormente se adjuntan, la suma de la energía interna (izquierda), 1100 mJ, más la energía cinética (derecha), 1550 mJ, de la tela daba una cantidad de 2650 mJ. Esta diferencia de energías se atribuye como en todos los casos anteriores a la disipación por rozamiento.



Gráficas 100 m/s

A continuación se muestra una gráfica representando la velocidad de impacto frente a la velocidad residual del proyectil de todos los ensayos realizados.



Gráfica de velocidades

En la anterior gráfica se puede apreciar ese punto al que nuestra fibra de aramida no consigue atrapar el proyectil, entre 47 y 50 m/s, y suponiendo así la perforación de la tela y su posterior aumento progresivo de esa velocidad residual.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, los artículos de Nilakantan [11], [12], [13], que se tuvieron en cuenta para la validación de los resultados de este modelo, solo nos permitían comparar hasta bajas velocidades de impacto, ya que en su artículo se centraba en la velocidad de rotura de la tela.

Ya se podía apreciar una ligera variación en la velocidad de impacto de 60 m/s pero se necesitaba contrastar con otros artículos para poder cuantificar la variación del modelo, por tanto se decidió seleccionar otros dos artículos científicos pertenecientes a la literatura [5], [10], que tenían datos de esas altas velocidades.

En estos artículos se refieren a un dato experimental. La velocidad de impacto de 245 m/s y una velocidad residual de 207 m/s.

- 245 m/s

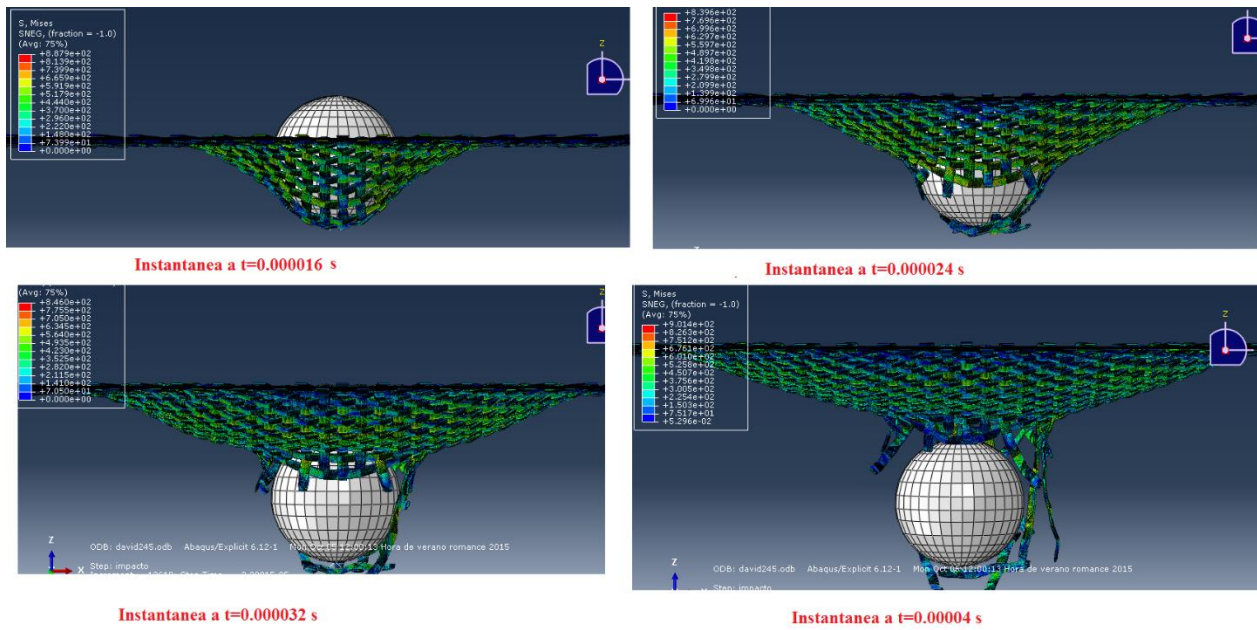


Figura 5.52

Velocidad residual experimental.(5)	Velocidad residual modelo mesoscópico(4)	Velocidad residual modelo macroscópico(4)	Velocidad residual del modelo estudiado en este documento.
207 m/s	218 m/s	226 m/s	238.8 m/s

Tabla 5

Como se observa en la tabla anterior, la velocidad con la que sale el proyectil tiene una pequeña variación con respecto a resultados que aparecen en la literatura leída [5], [10], la cual se debe a que en estos artículos, a la aramida se la ha dotado de unas propiedades ortótropas, mientras que en el caso estudiado se le dotó de isotrópicas para hacer más sencilla la simulación.

5.1 Discusión de resultados.

Con todos los datos hallados, se puede proceder al comentario de ellos. Principalmente hay que tener en cuenta que son datos obtenidos de una simulación numérica, es decir que no tienen por qué ser parejos con la realidad, aunque sería muy productivo para trabajos futuros en este campo que así lo fuesen y por tanto se daría un buen punto de partida para seguir trabajando hasta conseguir un modelo que reprodujese la realidad de los impactos sobre estos tejidos fielmente.

También merece la pena mencionar la cantidad de valores que se deben tener en cuenta en un estudio como este y la disparidad de los datos a los que se puede tener acceso en temas como propiedades de la aramida.

De la recopilación de datos de la simulación propuesta se llega a tres conclusiones fundamentales del proyecto realizado.

1. Como ya se ha ido comentando, la primera de las conclusiones es que a medida que se va aumentando la velocidad de impacto del proyectil, el daño se va focalizando en la zona de impacto, rompiendo las fibras a su paso y dejando las fibras alejadas de esta zona de impacto sin daño y con apenas tensión.
2. El daño que va generando la bala aumenta con su velocidad, dejando en la tela a su paso una mayor abertura puesto que las fibras rompen cada vez más frágilmente al paso del proyectil.
3. Y por último se puede deducir que el modelo presentado en este documento tiene una respuesta extremadamente fiel y por tanto positiva a unas bajas velocidades de impacto, pero en altas velocidades de impacto la simulación propuesta baja su efectividad y se produce una variación de entre un 10%-15% con respecto a las velocidades residuales de los artículos utilizados. Es decir que el modelo aquí descrito se debería usar únicamente para bajas velocidades de impacto.

6. Conclusiones.

Para finalizar este documento se procede a comentar los objetivos alcanzados al finalizar este proyecto.

Para comenzar se ha logrado construir un modelo de simulación de impactos sobre una lámina de fibras en Abaqus, con sus correspondientes comprobaciones, que responde muy bien a bajas velocidades pero con pequeñas variaciones a altas.

Se ha diseñado también una gráfica que muestra la respuesta de la tela diseñada en función de la velocidad de impacto. La fibra de aramida es un material muy resistente y de muy buenas propiedades para este tipo de experimentos y para su uso comercial, ya que para su poco peso consigue atrapar el proyectil, previniendo así la perforación y daños del sujeto que se proteja con ello.

Se ha conseguido, a su vez, un manejo muy fluido al utilizar Abaqus, ya que para la realización de este proyecto se ha necesitado conocer en profundidad cómo funciona este software, qué parámetros utiliza y cómo varían sus resultados al cambiar mínimamente las propiedades o las condiciones de contorno. También el uso del Creo Parametric que ha servido para descubrir un programa que permite realizar una gran cantidad de geometrías y formas para un sólido, que hacen de este programa uno de los pilares de la ingeniería mecánica.

Y por último destacar mi opinión personal acerca del proyecto, ya que he disfrutado mucho en su realización, con sus momentos de alegría cuando se conseguían algunos resultados positivos o cuando se llegaba a un callejón sin salida, la manera de trabajar cuando no se sabe la solución que se debe dar al problema y hay que indagar y realizar variaciones de todo, hasta dar con algo que por fin empieza a dar resultados.

6.1 Trabajos futuros.

Este proyecto, por sus características y por sus resultados es un primer escalón en cuanto a ensayos de este tipo. Por tanto merecerá la pena la continuación y mejora del mismo para obtener modelos mucho más perfectos y más detallados.

Sería de gran ayuda la creación de una subrutina que tenga en cuenta las propiedades ortotrópicas de la aramida. El presente trabajo emplea una aproximación, ya que se ha considerado unas propiedades isotrópicas para la tela consiguiendo así una menor dificultad a la hora de la consecución de resultados pero al fin y al cabo es una aproximación

Beneficiaría también la realización de ensayos experimentales propios para recabar mayor cantidad de información. Los datos con los que se ha realizado este proyecto no son propios, están recabados de la literatura leída y la mayoría son de simulaciones con propiedades muy dispares. Los ensayos experimentales de impacto también proporcionarían información sobre la ruptura del material de forma que resulte más sencillo variar las propiedades hasta conseguir resultados positivos.

(página en blanco a propósito)

7. Bibliografía.

- [1]. *INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS: APLICACIÓN A LA MECÁNICA DE SÓLIDOS. Autores: Carlos Navarro Ugena, José Luis Pérez Castellanos*
- [2]. *DESIGN AND MANUFACTURE OF TEXTILE COMPONENTS. Edited by A.C. Long First published 2005.*
- [3]. *MODELING AND PREDICTING TEXTILE BEHAVIOUR. Edited by X. Chen First published 2010.*
- [4]. *ABAQUS ANALYSIS USER'S MANUAL. Version 6.12. Simulia*
- [5]. *NUMERICAL ANALYSIS OF A BALLISTIC IMPACT ON TEXTILE FABRIC. Cuong Ha-Minha, Abdellatif Imada, Toufik Kanit , Francois Boussu. Published by International Journal of Mechanical Sciences 2014.*
- [6]. *FINITE ELEMENT SHEAR MODELING OF WOVEN FABRIC TEXTILE COMPOSITE. R.K.Misra, Anurag Dixit, Harlal Singh Mali. Publisheb by Procedia Materials Science 6 (1344 – 1350). 2014*
- [7]. *FINITE ELEMENT COMPRESION MODELING OF 2x2 TWILL WOVEN FABRIC TEXTILE COMPOSITE. R.K.Misra, Anurag Dixit, Harlal Singh Mali. Published by Procedia Materials Science 6 (1143 – 1149). 2014*
- [8]. *FINITE ELEMENT MODELING OF TRANSVERSE IMPACT ON A BALLISTIC FABRIC. Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B. Powers. Published by International Journal of Mechanical Sciences 48 (33–43). 2006.*
- [9]. *MODELING THE ROLE OF FRICTION DURING BALLISTIC IMPACT OF A HIGH-STRENGTH PLAIN-WEAVE FABRIC. Y. Duan, M. Keefe, T.A. Bogetti, B.A. Cheeseman. Published by Composite Structures 68 (331–337). 2005.*
- [10]. *MODELING THE EFFECTS OF YARN MATERIAL PROPERTIES AND FRICTION ON THE BALLISTIC IMPACT OF A PLAIN-WEAVE FABRIC. M.P. Rao, Y. Duan, M. Keefe, B.M. Powers, T.A. Bogetti. Published by Composite Structures 2009.*

- [11]. *BALLISTIC IMPACT MODELING OF WOVEN FABRICS CONSIDERING YARN STRENGTH, FRICTION, PROJECTILE IMPACT LOCATION, AND FABRIC BOUNDARY CONDITION EFFECTS.* Gaurav Nilakantan, John W. Gillespie Jr. Published by Composite Structures 2012.
- [12]. *FINITE ELEMENT ANALYSIS OF PROJECTILE SIZE AND SHAPE EFFECTS ON THE PROBABILISTIC PENETRATION RESPONSE OF HIGH STRENGTH FABRICS.* Gaurav Nilakantan, Eric D. Wetzel, Travis A. Bogetti, John W. Gillespie Jr. Published by Composite Structures 2012
- [13]. *A DETERMINISTIC FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE EFFECTS OF PROJECTILE CHARACTERISTICS ON THE IMPACT RESPONSE OF FULLY CLAMPED FLEXIBLE WOVEN FABRICS.* Gaurav Nilakantan, Eric D. Wetzel, Travis A. Bogetti, John W. Gillespie Jr. Published by Composite Structures 2013.
- [14]. EFFECTS OF FABRIC TARGET SHAPE AND SIZE ON THE V_{50} BALLISTIC IMPACT RESPONSE OF SOFT BODY ARMOR. Gaurav Nilakantan, Steven Nutt. Published by Composite Structures 2014.
- [15]. FINITE ELEMENT SIMULATIONS OF TEXTILE COMPOSITE FORMING INCLUDING THE BIAXIAL FABRIC BEHAVIOUR. P. Boisse, M. Borr , K. Buet and A. Cherouat. Published by Composites Part B: Engineering. 1997.